



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

DISEÑO Y CÁLCULO DE UN SISTEMA DOMÉSTICO DE  
PRODUCCIÓN DE ACS A PARTIR DE BIOGÁS Y  
ECONÓMICAMENTE VIABLE PARA EL ÁREA RURAL BOLIVIANA

Alumno: Óscar Paz Sagüés

Tutor: Vicente Senosiáin Miquélez

Pamplona, 20 de Febrero de 2014



## Resumen

---

La realidad energética que se vive hoy día en Bolivia, así como en otros muchos países en vías de desarrollo, es la descentralización de la población frente a una red eléctrica muy concentrada en determinadas zonas. Este tipo de población dispersa en pequeños núcleos rurales, a veces de difícil acceso, y con necesidades de potencia relativamente bajas, no justifica para los gobiernos o las compañías distribuidoras la extensión de la red, ya que supondría un alto coste frente a un reducido beneficio, muy complicado de amortizar a corto plazo.

Sin embargo, este aislamiento energético de las zonas rurales supone un obstáculo al desarrollo de estas zonas, lo que acrecenta cada vez más las diferencias en el nivel de vida entre los habitantes del área urbana, que si tienen acceso a la electricidad, y los del área rural.

En la práctica cuando se tienen núcleos rurales de tamaño relativamente grande o un cierto número de comunidades dentro de un área pequeña, se apuesta por la generación aislada. Esta generación consiste en una pequeña red que cuenta con un centro generador de baja potencia y una red de distribución propia completamente desvinculada del sistema de transporte general. Hasta hace unos años el sistema de generación consistía en la utilización de combustibles fósiles mediante un grupo electrógeno. Sin embargo, gracias al descenso paulatino de los costes y a la mejora de la eficiencia de las tecnologías renovables, solar y eólica, unido al gran potencial energético de algunos de estos lugares, éstas se han ido incorporando como complemento o sustitución del grupo electrógeno.

Otra de las tecnologías de carácter renovable recientemente introducida en estos sistemas es la producción de biogás con el que sustituir los tradicionales combustibles fósiles utilizados en el grupo electrógeno. Esta introducción se hace más plausible en el sentido de la actividad de los habitantes de estas comunidades relativamente aisladas es eminentemente agrícola y ganadera. Los desechos de estas actividades son principalmente orgánicos y si no se tratan adecuadamente pueden suponer un problema medioambiental serio y comprometer la salud de las personas al contaminar las fuentes de agua potable. Por lo que la utilización de biodigestores supone una solución simultánea, tanto a dependencia energética, como a la depuración de los desechos de la agricultura y la ganadería. Así mismo, los biodigestores generan una importante cantidad de fertilizante natural.

Por otro lado, el biogás puede ser utilizado de forma directa, a diferencia de la energía solar y eólica, sin necesidad de líneas de distribución, convertidores, baterías etc. que encarecen el sistema. A pesar de que el rendimiento energético del gas es inferior al de la electricidad, su uso, así como su instalación, es mucho más barato y simple, por lo que supone una alternativa muy interesante a corto plazo en aquellas comunidades que no disponen de recursos suficientes para permitirse una red aislada y sustituir la biomasa que tradicionalmente se utilizaba, o en el mejor de los casos, únicamente para tratar los desechos biológicos, con la ventaja de generar una cantidad de combustible natural al mismo tiempo.

Sin embargo, la utilización del biogás de forma directa supone el diseño de aparatos específicos que puedan funcionar de forma eficiente con este gas, entendidos dentro de la limitada capacidad económica donde se instala el biodigestor. Así en este sentido, existen diversos estudios de cálculo y diseño de cocinas y sistemas de iluminación y calefacción.

Así con este proyecto se pretende abrir una línea de estudio hasta ahora poco tratada, como son los calentadores de biogás, siempre contextualizados en la realidad social y económica en las que se encuentran estas comunidades rurales.

Al proyecto se le ha querido dar un carácter práctico, de forma que a pesar de existir un diseño fundamentado en aquellos criterios que he considerado más importantes, recopila toda la información que se ha utilizado de forma que el documento se convierta en una herramienta útil para la modificación y mejora del calentador que aquí se estudia, o un nuevo diseño. El proyecto se estructura en una primera parte en la que se establecen los objetivos que se desea cumplir a la finalización del trabajo, así como una justificación del proyecto presentando de forma más extensa la realidad energética de Bolivia. Una segunda parte trata sobre el diseño, justificación y cálculo por modelizado en MATLAB de las diferentes partes del calentador. Posteriormente se comprueban y analizan experimentalmente ciertos parámetros del calentador y se comprueba la correspondencia entre los datos obtenidos a través del modelo y la realidad. Por último se resume los conocimientos recopilados en una guía práctica para la construcción del calentador.





## Agradecimientos

---

Quiero expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que de una forma u otra han estado ahí, me han apoyado e influido durante la estancia en Bolivia y el tiempo durante el cual se ha realizado este proyecto. En especial a:

Susana Irisarri y Vicente Senosiáin, mi tutor, por haberme brindado la oportunidad de llevar a cabo el proyecto final de carrera en un país como Bolivia, con todas las experiencias que ello conlleva.

Alba Gamarra, directora de CINER, por habernos tendido su mano a nuestra llegada a un país extranjero, habernos ofrecido sus oficinas como lugar de trabajo y habernos aportado mucha de la documentación técnica de la que se nutre este estudio.

Diego Rada, gerente del Matadero Municipal de Cochabamba y a todo el personal que se involucró completamente en la realización de las pruebas con los biodigestores, por esa ayuda desinteresada en la instalación de cada uno de los elementos que necesité.

Jaime Martí Herrero, doctor investigador del CIMNE y promotor del actual proyecto, que con un amplio recorrido en la instalación de biodigestores familiares en Sudamérica, me aportó esa visión práctica en el diseño del calentador y desde la que se ha querido enfocar la redacción de esta memoria.

Mi familia, especialmente mis padres y mi novia, amigos y compañeros, por el apoyo incondicional y por aguantarme en aquellos días en los que el trabajo se volvía más complicado y por extensión, mi carácter.



# Índice

---

RESUMEN .....	3
AGRADECIMIENTOS.....	5
ÍNDICE .....	7
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	11
ÍNDICE DE TABLAS .....	15
1. INTRODUCCIÓN.....	19
1.1. ORIGEN Y MOTIVACIÓN DEL PROYECTO .....	21
1.2. MARCO INSTITUCIONAL.....	21
1.3. PROPÓSITO, METODOLOGÍA Y ALCANCE .....	21
1.4. HERRAMIENTAS .....	23
1.5. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	24
1.6. PLANTEAMIENTO INICIAL .....	25
1.7. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	26
2. ANTECEDENTES.....	27
2.1. SITUACIÓN POLÍTICA .....	29
2.2. SITUACIÓN ECONÓMICA .....	30
2.3. SITUACIÓN SOCIAL.....	31
2.4. SITUACIÓN ENERGÉTICA .....	31
2.4.1. Balance energético de Bolivia .....	32
2.4.2. El sector eléctrico.....	33
2.4.3. La energía rural .....	34
2.5. BIOGÁS. LA ALTERNATIVA ECONÓMICA A CORTO PLAZO.....	36
2.5.1. La tecnología en Bolivia .....	37
2.5.2. La producción de biogás.....	39
2.5.3. Utilidades del biogás .....	40
3. MARCO TEÓRICO .....	41
3.1. PRODUCCIÓN DE ACS Y CALENTADORES DE AGUA. ....	43
3.2. ELECCIÓN DEL CALENTADOR .....	45
3.3. CALENTADORES INSTANTÁNEOS DE GAS .....	46
3.3.1. El quemador.....	48
3.3.2. El intercambiador .....	50
3.3.3. La carcasa.....	54
4. MODELADO.....	57
4.1. MODELADO DEL QUEMADOR .....	59

4.1.1. Descripción general y geometría.....	59
4.1.2. Caracterización de los fluidos involucrados.....	59
4.1.3. Problema general.....	60
4.1.4. Cálculo del quemador para pruebas experimentales.....	63
4.2. MODELADO DEL INTERCAMBIADOR.....	64
4.2.1. Descripción general y geometría.....	65
4.2.2. Caracterización de los fluidos involucrados.....	66
4.2.3. Método $\varepsilon$ -NTU. Cálculo de la temperatura de los GPC.....	67
4.2.4. Método por elementos finitos. Cálculo de la temperatura del agua.....	71
5. PRUEBAS.....	81
5.1. JUSTIFICACIÓN EXPERIMENTAL.....	83
5.2. INSTALACIÓN.....	83
5.3. INSTRUMENTACIÓN.....	85
5.4. PROCEDIMIENTO GENERAL.....	88
5.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	89
5.6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	95
5.6.1. Experimento I. Cabezal del quemador.....	95
5.6.2. Experimento II. Aire primario.....	98
5.6.3. Experimento III. Caracterización de la carcasa de ladrillo.....	100
5.6.4. Experimento IV. Serpentin helicoidal.....	102
5.6.4.1. Instalación modificada.....	102
5.6.4.2. Instrumentación alternativa.....	103
5.6.4.3. Procedimiento.....	103
5.6.4.4. Análisis de los resultados.....	104
5.6.4.5. Resultados y conclusiones.....	106
5.6.4.6. Comparación de los datos experimentales con el modelo.....	109
6. GUÍA DE CONSTRUCCIÓN.....	113
6.1. DEFINICIÓN DEL ESCENARIO.....	115
6.2. CÁLCULO DE ELEMENTOS.....	115
6.2.1. Diseño del quemador.....	115
6.2.2. Diseño del intercambiador.....	116
6.2.3. Diseño de la carcasa.....	120
6.3. MATERIALES Y CONSTRUCCIÓN.....	122
6.4. EJEMPLO Y COSTE APROXIMADO.....	126
6.5. INSTALACIÓN Y USO.....	131
6.5.1. Localización del calentador.....	131
6.5.2. Reservorio de biogás y uso.....	132

6.5.3. Recomendaciones y mantenimiento.....	134
7. CONCLUSIONES.....	137
7.1. LIMITACIONES DEL TRABAJO .....	139
7.2. POSIBLES MEJORAS Y CAMINO A SEGUIR.....	140
7.3. CONCLUSIONES PERSONALES.....	141
ANEXOS.....	143
A.1. Mapa físico de Bolivia. Fuente: Instituto Geográfico Militar (Bolivia) .....	145
A.2. Mapa político de Bolivia. Fuente: Instituto Geográfico Militar (Bolivia) .....	146
A.3. Mapa energético de Bolivia. Fuente: Balance Energético Nacional 2000-2009.....	147
A.4. Mapa del sistema interconectado de Bolivia a 2010. Fuente: BEN 2000-2009.....	148
A.5. Mapa de poblaciones sin electricidad en Bolivia. Fuente: INE 2004 Bolivia .....	149
B.1. Propiedades de los fluidos. Variación con la temperatura y la presión.....	151
B.2. La ecuación de Bernoulli y el efecto Venturi .....	153
B.3. El proceso de combustión y la llama .....	155
B.4. Ecuaciones de diseño para un quemador de gas.....	160
B.5. Relaciones gobernantes para un intercambiador de calor .....	163
B.6. El proceso de transmisión de calor. General .....	166
B.7. El proceso de transmisión de calor. Conducción.....	166
B.8. El proceso de transmisión de calor. Convección .....	168
B.9. El proceso de transmisión de calor. Radiación.....	173
C.1. Experimento I. Cabezal del quemador .....	175
C.2. Experimento II. Aire primario .....	199
C.3. Experimento III. Caracterización de la carcasa de ladrillo .....	208
C.4. Experimento IV. Serpentin helicoidal .....	220
C.5. Planos. Inyector.....	232
C.6. Planos. Carcasa de metal.....	233
C.7. Planos. Quemador de caja .....	234
C.8. Planos. Soporte para quemador de soplete .....	235
D.1. MATLAB. Calculo de las propiedades del biogás.....	236
D.2. MATLAB. Calculo de las propiedades del aire .....	236
D.3. MATLAB. Calculo de las propiedades de una mezcla biogás-aire.....	237
D.4. MATLAB. Calculo quemador .....	237
D.5. MATLAB. Calculo de las propiedades del agua .....	240
D.6. MATLAB. Calculo de las propiedades de los GPC .....	240
D.7. MATLAB. Calculo de la transmisión de calor para EU.....	242
D.8. MATLAB. Calculo del intercambiador.....	243
BIBLIOGRAFÍA.....	249



# Índice de ilustraciones

Ilustración 1.1. Definición de los límites de trabajo. Fuente: Elaboración propia.....	24
Ilustración 2.1. Estructura de la Producción de Energía Primaria. Fuente: Balance Energético Nacional 2000-2010.....	32
Ilustración 2.2. Estructura de la Producción de Energía Primaria. Fuente: Balance Energético Nacional 2000-2010.....	33
Ilustración 2.3. Estructura de consumo final de energía por fuentes (izqda.) y por sectores (dcha.) Fuente: Balance Energético Nacional 2000-2010.....	33
Ilustración 2.4. Instituciones Bolivianas de administración y regulación, y empresas participantes en el SIN. Fuente: Autoridad de Fiscalización y Control Social de Electricidad de Bolivia.....	34
Ilustración 2.5. Municipios Bolivianos y relación cobertura eléctrica-pobreza. Fuente: Análisis de la demanda de electrificación rural. Energética. 2005; INE 2001; Reportes de NBI.....	35
Ilustración 2.6. Biodigestor familiar (izqda.) y cocinilla de biogás (dcha.).....	37
Ilustración 2.7. Descomposición de la biomasa en sus diferentes componentes. Fuente: Informe complementario sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogás en Extremadura. .	38
Ilustración 3.1. Sistema de Producción de ACS por colector solar (izqda.) y sistema de climatización geotérmica (dcha.).....	44
Ilustración 3.2. Calentador acumulativo eléctrico y de combustión (izqda.) y calentador instantáneo de combustión (dcha.).....	45
Ilustración 3.3. Esquema de calentador instantáneo doméstico de gas. Fuente: Elaboración propia.....	47
Ilustración 3.4. Esquema de calentador instantáneo de gas simplificado. Fuente: Elaboración propia.....	48
Ilustración 3.5. Esquema y partes de un quemador atmosférico. Fuente: Biblioteca del Instalador de Gas. A.L. Miranda, R. Oliver.....	48
Ilustración 3.6. Materialización de las calderas de combustible sólido, líquido y gaseoso. Fuente: DOCUMENTOS TÉCNICOS DE INSTALACIONES EN LA EDIFICACIÓN DTIE, Pedro Pozo.....	50
Ilustración 3.7. Perfil de temperaturas para la pared del intercambiador limpia (A) y con incrustaciones de 3mm (B). Fuente: DOCUMENTOS TÉCNICOS DE INSTALACIONES EN LA EDIFICACIÓN DTIE, Pedro Pozo.....	52
Ilustración 3.8. Temperaturas de la pared metálica del intercambiador en función del espesor de las incrustaciones (arriba) y solubilidad de distintas sales en agua en función de la temperatura (abajo). Fuente: DOCUMENTOS TÉCNICOS DE INSTALACIONES EN LA EDIFICACIÓN DTIE, Pedro Poz (arriba), Wikipedia (abajo).....	53
Ilustración 3.9. Intercambiador con aletas (izqda.), superficies plegadas (centro) y intercambiador de fundición (dcha.).....	54
Ilustración 3.10. Geometría seleccionada para el intercambiador del quemador. ....	54
Ilustración 4.1. Esquema del quemador del calentador. Fuente: Elaboración propia.....	59
Ilustración 4.2. Esquema general del modelo (izqda.) y esquema del intercambiador (dcha.). Fuente: Elaboración propia.....	65
Ilustración 4.3. Simplificación del intercambiador para el cálculo de la temperatura de los GPC con la altura. Fuente: Elaboración propia.....	67
Ilustración 4.4. Relación entre el ángulo girado y la altura en una curva helicoidal. Fuente: Elaboración propia	68
Ilustración 4.5. Representación gráfica en MATLAB de la temperatura de los GPC en función de la altura para diferente número de bobinados concéntricos. Fuente: Elaboración propia.....	70
Ilustración 4.6. Esquema de división del intercambiador en elementos finitos. Fuente: Elaboración propia.....	71
Ilustración 4.7. Esquema de elemento unitario del intercambiador. Fuente: Elaboración propia.....	72
Ilustración 4.8. Configuraciones de flujo del intercambiador. Fuente: Elaboración propia.....	75
Ilustración 4.9. Esquema del proceso de cálculo de los elementos unitarios para una única bobina. Fuente: Elaboración propia.....	75
Ilustración 4.10. Temperatura del agua en función de la longitud recorrida en el intercambiador para flujo a favor de corriente y a contracorriente (arriba) y para flujo mixto (abajo). Fuente: Elaboración propia.....	76
Ilustración 4.11. Temperatura del agua en función de la longitud recorrida en el intercambiador variando diferentes parámetros (de arriba abajo: altitud, caudal de agua y caudal de biogás) para las condiciones de ilustración 4.10. Fuente: Elaboración propia.....	78
Ilustración 4.12. De arriba a abajo: temperaturas del agua (°C), calor convectivo (W) y calor radiante (W) para cada elemento diferencial. Fuente: Elaboración propia.....	79

Ilustración 5.1. Biodigestores experimentales del Matadero Municipal de Cochabamba (izqda.) y caudalímetro con sistema de control de presión (dcha.) .....	83
Ilustración 5.2. Esquema de instalación para las pruebas experimentales. Fuente: Elaboración propia .....	84
Ilustración 5.3. Instalación montada en el Matadero con el depósito y la caseta (izqda.) y lugar de pruebas (dcha.) .....	84
Ilustración 5.4. Gasómetro (izqda.) y válvulas de bola (dcha.) .....	85
Ilustración 5.5. Dimensiones del depósito (izqda.) y colocación para pruebas (dcha.) .....	86
Ilustración 5.6. Perola (izqda.) y termómetro digital (dcha.) .....	86
Ilustración 5.7. Inyector con cabezal de tipo soplete (izqda.) y cabezal circular (dcha.). NOTA: al inyector no se le han mecanizado las lumbreras .....	87
Ilustración 5.8. Carcasa metálica cilíndrica (izqda.), quemador en el interior de carcasa cilíndrica (centro) y carcasa de ladrillo (dcha.) .....	88
Ilustración 5.9. Esquema del montaje para la realización de las pruebas. Fuente: Elaboración propia .....	88
Ilustración 5.10. Volumen de biogás consumido a lo largo de una prueba con el tiempo (arriba) y caudal instantáneo para tres pruebas diferentes con tres masas de control distintas (abajo). Fuente: Elaboración propia. ....	90
Ilustración 5.11. Perfil de temperaturas teórico del calentamiento de una masa de agua a sometida a un aporte de energía constante. ....	91
Ilustración 5.12. Esquema simplificado del problema de transmisión de calor a la perola. Fuente: Elaboración propia .....	92
Ilustración 5.13. Curva de calentamiento de un sistema concentrado (discontinua) y comparación con la curva de calentamiento del agua (continua). Fuente: Elaboración propia .....	93
Ilustración 5.14. Curvas de temperatura obtenidas en las pruebas mostradas en la Ilustración 5.10. Fuente: Elaboración propia .....	93
Ilustración 5.15. Calores generados y absorbidos para una prueba aleatoria. Fuente: Elaboración propia .....	94
Ilustración 5.16. Resultados de experimento I (Cabezales del quemador), calor absorbido (arriba) y rendimiento (abajo) frente al caudal de biogás. Fuente: Elaboración propia .....	97
Ilustración 5.17. Aire primario al 50% (izqda.) y aire primario al 0% (dcha.) .....	98
Ilustración 5.18. Resultados de experimento II (Aire primario), rendimiento frente al caudal de aire primario. Fuente: Elaboración propia .....	99
Ilustración 5.19. Sección de paso de los GPC en la carcasa de metal y de ladrillo. ....	100
Ilustración 5.20. Resultados de experimento III (Carcasa de ladrillo), calor absorbido (arriba) y rendimiento (abajo) frente al caudal de biogás. Fuente: Elaboración propia .....	101
Ilustración 5.21. Esquema de instalación para el experimento VI (Serpentín helicoidal). Fuente: Elaboración propia .....	103
Ilustración 5.22. Serpentín helicoidal de cobre (izqda.), depósito de agua (centro) y tubo transparente (dcha.) .....	103
Ilustración 5.23. Representación del incremento de temperatura en el serpentín en función del tiempo para una prueba en la que a variado el caudal de agua (discontinua) y otra en la que no (continua). Fuente: Elaboración propia .....	104
Ilustración 5.24. Representación del incremento de temperatura y el volumen de biogás consumido para una prueba aleatoria. Fuente: Elaboración propia .....	105
Ilustración 5.25. Representación gráfica del incremento de temperatura en función del caudal de biogás y recta ajustada, para una prueba aleatoria. Fuente: Elaboración propia .....	106
Ilustración 5.26. Representación de todos los puntos de incremento de temperatura frente a caudal de la totalidad de las pruebas. Fuente: Elaboración propia .....	107
Ilustración 5.27. Representación de las rectas ajustadas para los datos de 1L/min (arriba) y 2,5 L/min (abajo). Fuente: Elaboración propia .....	108
Ilustración 5.28. Distribución de temperaturas en el serpentín para un caudal de agua de 1L/min (izqda.) y 2,5 L/min (dcha.) . Fuente: Elaboración propia .....	110
Ilustración 5.29. Temperatura del agua en función de la longitud recorrida del serpentín. Fuente: Elaboración propia .....	110
Ilustración 5.30. Comparación gráfica de los datos experimentales (puntos y líneas continuas) y los resultados del modelo en MATLAB (líneas discontinuas). Fuente: Elaboración propia .....	111
Ilustración 6.1. Quemador diseñado para las pruebas experimentales de este trabajo. Cabezal (izqda.), garganta o tubo de mezcla (centro) e inyector (dcha.) .....	116



Ilustración 6.2. Distribución de temperaturas para algunos de los casos mostrados en la tabla 6.1. Fuente: Elaboración propia.....	117
Ilustración 6.3. Ejemplo de serpentín ineficiente. El intercambiador recorre zonas "frías" del calentador en las que el agua apenas aumenta su temperatura. Fuente: Elaboración propia .....	118
Ilustración 6.4. Representación de la temperatura en función de la longitud del calentador, de arriba a abajo, para n=5, 4, 3 y 2. Fuente: Elaboración propia.....	119
Ilustración 6.5. Adaptador para la manguera (izqda.) y serpentín utilizado en las pruebas (dcha.) .....	120
Ilustración 6.6. Carcasa construida con lámina metálica (sin aislar), (izqda.) y carcasa de ladrillo (dcha.) ....	120
Ilustración 6.7. Esquema de la carcasa y dimensiones básicas. Fuente: Elaboración propia .....	121
Ilustración 6.8. Esquema de la tapa de la carcasa y dimensiones básicas. Fuente: Elaboración propia .....	122
Ilustración 6.9. Montaje del conjunto del quemador utilizado en las pruebas. Fuente: Elaboración propia .....	123
Ilustración 6.10. Proceso de conformado del serpentín (n=3, l=2). Fuente: Elaboración propia.....	124
Ilustración 6.11. Forma y dimensiones generales de las barras guía. Fuente: Elaboración propia .....	125
Ilustración 6.12. Temperaturas de salida del agua del calentador para diferentes caudales para los escenarios 1 y 2. Fuente: Elaboración propia .....	128
Ilustración 6.13. Esquema de construcción de la carcasa a partir de ladrillos. Fuente: Elaboración propia .....	129
Ilustración 6.14. Colocación de varios reservorios intermedios y distribución de gas. Fuente: Elaboración propia .....	132
Ilustración 6.15. Depósito de biogás utilizado en las pruebas .....	133
Ilustración 6.16. Esquema del montaje para utilizar el calentador de biogás. Fuente: Elaboración propia .....	133
Ilustración 0.1. Línea de corriente fluida .....	153
Ilustración 0.2. Variación del poder de emisión de cuerpo negro con la longitud de onda para varias temperaturas. Fuente: Transferencia de Calor y Masa-Junus A. Çengel.....	158
Ilustración 0.3. Variación de la velocidad de propagación con el ratio de aire para varios gases (izqda.) y fenómenos de avance y retroceso de llama (dcha.). Fuente: Heat Transfer-J.P. Holman.....	159
Ilustración 0.4. Esquema de un inyector atmosférico. Fuente: Elaboración propia.....	160
Ilustración 0.5. Coeficientes de descarga para diferentes tipos de inyector. Fuente: Elaboración propia.....	161
Ilustración 0.6. Sistemas de control de apertura de las lumbrreras. Fuente: Biogas Stove Design, David Fulford .....	162
Ilustración 0.7. Sistemas de estabilización de la llama. Fuente: Biogas Stove Design, David Fulford .....	163
Ilustración 0.8. Aireación secundaria del quemador. Fuente: Biogas Stove Design, David Fulford .....	163
Ilustración 0.9. Arreglos básicos de intercambiador, a favor de corriente (izqda.) y a contracorriente (dcha.) y perfiles de temperatura. Fuente: Elaboración propia .....	164
Ilustración 0.10. Trasmisión de calor por conducción a través de una superficie aleatoria de un cuerpo. Fuente: Elaboración propia.....	166
Ilustración 0.11. Trasmisión de calor por conducción a través de una pared plana (izqda.) y de un cilindro (dcha.). Fuente: Elaboración propia .....	167
Ilustración 0.12. Mecanismos de convección involucrados en el problema particular de este trabajo. Fuente: Elaboración propia.....	170
Ilustración 0.13. Flujo a través de un banco de tubos .....	171
Ilustración 0.14. Intensidad de radiación varios gases en función de su longitud de onda .....	174
Ilustración 0.15. Coeficiente de trasmisión de calor para gases triatómicos para una mezcla de 12% de CO <sub>2</sub> y 12% de H <sub>2</sub> O en función del espesor de la capa de gases y la temperatura (izqda.) y aproximación para una capa de 10 cm (dcha.) .....	174



# Índice de tablas

Tabla 1.1. Metodología de compleción del PFC. Fuente: elaboración propia .....	22
Tabla 2.1. Producción de energía primaria. Fuente: Balance Energético Nacional 2000-2010 .....	32
Tabla 2.2. Diferencias de patrones de consumo energético entre una familia rural y una familia urbana Fuente: Energía y Desarrollo Sustentable en ALAC. Estudio de caso de Bolivia. OLADE, CEPAL, GTZ. 1997. ....	35
Tabla 2.3. Intervalos de temperaturas en el que trabajan las bacterias anaeróbicas. Fuente: Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento (GTZ GmbH, 1999) .....	39
Tabla 2.4. Tiempo de retención según temperatura. Fuente: Guía de biodigestores familiares, Jaime Martí .....	39
Tabla 3.1. Clasificación y características de los quemadores de gas. Fuente: Biblioteca del Instalador de Gas. A.L. Miranda, R. Oliver.....	49
Tabla 3.2. Valores orientativos de los coeficientes de convección. Fuente: DOCUMENTOS TÉCNICOS DE INSTALACIONES EN LA EDIFICACIÓN DTIE, Pedro Pozo .....	51
Tabla 3.3. Valores orientativos de los coeficientes de conducción. Fuente: DOCUMENTOS TÉCNICOS DE INSTALACIONES EN LA EDIFICACIÓN DTIE, Pedro Pozo .....	52
Tabla 3.4. Valores orientativos de los coeficientes de conducción para varios materiales aislantes. Fuente: Elaboración propia.....	55
Tabla 4.1. Variables necesarias para la resolución del problema del quemador. Fuente: Elaboración propia.....	60
Tabla 4.2. Tubos de fontanería normalizados en pulgadas y diámetros equivalentes en mm. Fuente: Elaboración propia.....	61
Tabla 4.3. Valor de las variables del quemador para pruebas experimentales. Fuente: Elaboración propia.....	64
Tabla 4.4. Resultados del problema para el quemador experimental. Fuente: Elaboración propia.....	64
Tabla 5.1. Especificaciones del gasómetro utilizado. Fuente: Elaboración propia .....	85
Tabla 5.2. Relación entre la masa colocada sobre el depósito y el caudal de biogás producido. Fuente: Elaboración propia.....	86
Tabla 5.3. Resumen experimento I (Cabezales del quemador). Fuente: Elaboración propia .....	96
Tabla 5.4. Resumen experimento II (Aire primario). Fuente: Elaboración propia.....	98
Tabla 5.5. Intervalos de temperatura seleccionados para cada una de las pruebas del experimento II (Aire Primario). Fuente: Elaboración propia .....	99
Tabla 5.6. Resumen experimento III (Caracterización de la carcasa de ladrillo). Fuente: Elaboración propia ...	100
Tabla 5.7. Comparación de rendimientos en la transferencia de calor entre la carcasa de metal y la de ladrillo. Fuente: Elaboración propia.....	102
Tabla 5.8. Resumen experimento IV (Serpentín helicoidal). Fuente: Elaboración propia.....	106
Tabla 5.9. Características de cada una de las pruebas realizadas con el serpentín. Fuente: Elaboración propia .....	107
Tabla 5.10. Resultados con base experimental del incremento de temperatura en un serpentín para diferentes caudales de biogás. Fuente: Elaboración propia.....	108
Tabla 5.11. Valor de las variables introducidas en el modelo en MATLAB para comparación con resultados experimentales. Fuente: Elaboración propia .....	109
Tabla 5.12. Comparación en las temperaturas de salida del agua en °C del modelo y experimental, para varios caudales de biogás y de agua. Fuente: Elaboración propia .....	110
Tabla 6.1. Número máximo de bobinados concéntricos para tubos de diferente diámetro externo. Fuente: Elaboración propia.....	117
Tabla 6.2. Materiales necesarios para la construcción del calentador. Fuente: Elaboración propia.....	123
Tabla 6.3. Valoración económica y recursos energéticos del escenario 1 y 2. Fuente: Elaboración propia.....	126
Tabla 6.4. Caudales de trabajo del escenario 1 y 2. Fuente: Elaboración propia.....	126
Tabla 6.5. Parámetros constructivos del quemador para el Escenario 1. Fuente: Elaboración propia .....	126
Tabla 6.6. Parámetros constructivos del quemador para el Escenario 2. Fuente: Elaboración propia .....	127
Tabla 6.7. Diámetros interno y externo disponibles para los escenarios 1 y 2. Fuente: Elaboración propia.....	127
Tabla 6.8. Variables extra a introducir en el modelo en MATLAB del intercambiador para los escenarios 1 y 2. Fuente: Elaboración propia.....	127
Tabla 6.9. Parámetros de salida del modelo de intercambiador para los escenarios 1 y 2. Fuente: Elaboración propia.....	128
Tabla 6.10. Parámetros de partida para la construcción de la carcasa. Fuente: Elaboración propia .....	129

Tabla 6.11. Altura mínima del intercambiador para los escenarios 1 y 2. Fuente: Elaboración propia .....	129
Tabla 6.12. Distancias relativas a la carcasa para los escenarios 1 y 2. Fuente: Elaboración propia .....	129
Tabla 6.13. Dimensiones requeridas para la tapa para los escenarios 1 y 2. Fuente: Elaboración propia .....	129
Tabla 6.14. Costes para el calentador del escenario 1. Fuente: Elaboración propia .....	130
Tabla 6.15. Costes para el calentador del escenario 2. Fuente: Elaboración propia .....	130
Tabla 6.16. Lugar ideal del calentador para diferentes factores, y solución en caso de no encontrar lugar ideal. Fuente: Elaboración propia.....	132
Tabla 0.1. Coeficientes de cálculo por regresión de varias propiedades para los fluidos involucrados. Fuente: Elaboración propia .....	152
Tabla 0.2. Coeficientes para pérdidas localizadas .....	154
Tabla 0.3. Propiedades de la llama en función de su tasa de aireación primaria. Fuente: Biblioteca del Instalador de gas, Instalaciones y equipos. A.L. Miranda y R. Oliver.....	158
Tabla 0.4. Relaciones para la efectividad para flujo a favor de corriente y a contracorriente. Fuente: Elaboración propia .....	165
Tabla 0.5. Valores de los coeficientes para la ecuación B.80 en función del número de Reynolds .....	170
Tabla 0.6. Valores de los coeficientes para la ecuación B.82 en función del número de Reynolds .....	171
Tabla 0.7. Coeficientes de corrección para la ecuación B.82 .....	171





# 1. Introducción

---

Para la realización de cualquier trabajo, incluido este, siempre es necesario una motivación por parte del autor que lo predisponga a invertir su tiempo y esfuerzo. En este capítulo se analizan las causas por las cuales se ha llevado a cabo, en qué contexto institucional y personal y se definen así mismo los objetivos a cumplir a su finalización y la metodología a seguir.

Por último, se pretende justificar el estudio en el marco económico y social que se explica en el punto 2





## 1.1. Origen y motivación del proyecto

En el marco económico y social boliviano que se explica más adelante, y el de mis propias inquietudes y necesidades personales se entiende y encausa este proyecto. En vista a mejorar las condiciones de vida en las áreas rurales aprovechando los recursos disponibles sin comprometer la economía de las familias.

La finalización de mis estudios en Ingeniería Industrial, implicaban la realización de un Proyecto Final de Carrera, de temática libre, en el que aunar todos los conocimientos adquiridos durante estos últimos años. Entre todos ellos, destacaban aquellos relativos a la transmisión de calor, la mecánica de fluidos, o los cálculos estructurales y de materiales, en detrimento de los conocimientos sobre electricidad u organización industrial. Así me encontraba más dispuesto y capaz a realizar un trabajo que profundizase en mayor medida en la temática a la que estaba acostumbrado.

Por otro lado, se me presentó la oportunidad de realizar un PFC involucrándolo en ámbito de la cooperación internacional, gracias a la realización de un cursillo durante el último cuatrimestre del año 2012, y la concesión de una beca por parte de la UPNA para finales de 2013. La aceptación de la beca, y la realización del proyecto en el extranjero, en este caso en Bolivia, suponía una reducción de las opciones de contenido del trabajo, sin embargo le otorgaba un sentido extra y una finalidad, personalmente, mucho más satisfactoria.

Fue finalmente la contraparte boliviana, la que me propuso la temática del presente trabajo, y que conseguía integrar, mis conocimientos de Ingeniería con intensificación en mecánica, con esa finalidad práctica que buscaba, al crear una fuente de información que pusiera en manos de aquel que deseara, la documentación necesaria para construir su propio sistema de producción de ACS. Aunque siempre con miras a ser utilizado en las áreas rurales más desfavorecidas de Bolivia.

## 1.2. Marco institucional

La realización del proyecto se incluye en los impulsados por el Programa de Formación Solidaria de la UPNA, enmarcado en la Cooperación Universitaria al Desarrollo, con el que se pretende fomentar la solidaridad y los valores de la cooperación al desarrollo entre estudiantes y docentes, al tiempo que ofrecer una formación profesional práctica en el mundo de la cooperación internacional. Este programa está cofinanciado por el Departamento de Asuntos sociales, Juventud y Deporte del Gobierno de Navarra.

En su contraparte en Bolivia se encuentran CINER y la Universidad Mayor de San Simón en Cochabamba. El CINER (Centro de Investigación de Energías Renovables) nace el año 1991 como una unidad de trabajo dentro del PROPER (Programa para la Difusión de Energías Renovables), contando con el “Know how” proporcionado por la Cooperación Técnica Alemana (GTZ). A partir del año 1997, agrupa a profesionales con amplia experiencia en el tema energético, desarrollo comunitario, planificación, monitoreo y evaluación, así como asistencia en temas normativos y jurídicos.

La iniciativa directa del proyecto parte de Jaime Martí Herrero, Doctor investigador del CIMNE (International Center for Numerical Methods in Engineering), que con una amplia experiencia y trayectoria en el campo del montaje de biodigestores familiares en Bolivia y Perú, vio la necesidad del estudio de factibilidad de calentadores de agua de bajo costo. Y en caso de resultados positivos, sentar así las bases para su construcción y diseminación en las distintas comunidades rurales de Bolivia.

## 1.3. Propósito, metodología y alcance

El trabajo se ha intentado enfocar desde un punto de vista práctico, ya que la finalidad última es que sirva como guía para la construcción de calentadores de biogás sin necesidad de tener conocimientos muy profundos en la materia. Así pues, con este proyecto se pretende el diseño de un calentador simple y barato cuya comprensión y construcción sea lo más simplificada posible. Se ha pretendido crear unos modelos sencillos que permitan calcular los parámetros básicos de forma rápida y sencilla, sin necesidad de conocer la teoría fundamental. No obstante, el trabajo aporta la información,

teoría y documentación necesaria para la comprensión, análisis y en su caso, modificación de los modelos si se considerase necesario.

---

### Establecer objetivos y limitaciones del proyecto

---

Se establecen los objetivos a cumplir para el marco en el que se encauza el proyecto

Se establecen las limitaciones técnicas y económicas para su diseño, así como los escenarios de trabajo

Se valoran las diferentes herramientas disponibles para el desarrollo de la idea



---

### Consulta bibliográfica

---

Consulta acerca de la situación económica y social de Bolivia

Consulta de bibliografía técnica acerca de mecánica de fluidos, transmisión de calor, calentadores de gas e intercambiadores

Aprendizaje acerca de las herramientas de trabajo propuestas para el diseño



---

### Diseño del modelo

---

Selección de la opción de calentador más adecuada, acorde con las limitaciones técnicas y económicas

Análisis individual de cada uno de los elementos indispensables para el calentador. Principios teóricos de funcionamiento.

Cálculo y desarrollo de modelo provisional en MATLAB de cada uno de los elementos.



---

### Pruebas experimentales

---

Diseño de experimentos que permitan obtener aquellos parámetros difícilmente calculables de forma teórica para introducir en el modelo

Diseño y construcción de los elementos necesarios para llevar a cabo las pruebas

Acondicionamiento de una zona de trabajo en la que se disponga de biogás para la realización de los experimentos

Realización de los experimentos y análisis de los resultados

Corrección y comprobación del modelo. Modelo definitivo.



---

### Guía práctica para la construcción de un calentador de biogás

---

Análisis práctico de los escenarios y pautas de utilización del modelo diseñado

Instrucciones para su construcción y recomendaciones de uso



---

### Conclusiones

---

Limitaciones del modelo

Posibles mejoras y camino a seguir

Valoración personal del trabajo realizado

---

**Tabla 1.1. Metodología de compleción del PFC. Fuente: elaboración propia**

En la primera parte del proyecto se sientan las bases teóricas necesarias para iniciar el diseño de un calentador de biogás y facilitar su comprensión. Se presentan las distintas formas por las que actualmente se genera agua caliente y más concretamente los calentadores de gas. En este punto se analizan todos los elementos fundamentales de un calentador de gas moderno, su función, e importancia relativa y una vez reducidos al mínimo, se procede a su simplificación. Todo ello con el objetivo principal de reducir sus costes y complejidad.

Una vez reducido el funcionamiento de un calentador de gas a sus elementos más fundamentales se pensó en la forma más adecuada para cada uno de ellos teniendo en cuenta diversos criterios (económicos y sociales). Posteriormente se analizan individualmente, y se recopila información para la creación de unos modelos que nos dieran los parámetros constructivos y de funcionamiento fundamentales en función de diversos factores de carácter eminentemente práctico (caudal de biogás, temperatura del aire, temperatura del agua, altitud sobre el nivel del mar, etc.)

Sin embargo, estos cálculos no son definitivos ya que sin una base experimental, podrían no corresponderse con la realidad. En la segunda parte del proyecto se analizan las pruebas realizadas con la finalidad de completar los modelos desarrollados en la primera parte. Se explica brevemente el lugar en el que fueron llevados a cabo así como la instalación construida. También se explican los cálculos llevados a cabo para comparar cada una de las pruebas. Una vez en posesión de datos reales se comparan con los obtenidos a través de los modelos y se completan estos últimos para que puedan ser utilizados de forma práctica.

Por último, se introduce una guía con información acerca de la utilización de los modelos, construcción del calentador y costes económicos aproximados. También se dan ciertos consejos para la utilización del biogás en base a la experiencia obtenida gracias a las pruebas, y ciertas pautas para el mantenimiento del calentador.

Con este proyecto se busca la creación de un modelo que sirva para la construcción de calentadores de agua de biogás con un reducido coste económico. Por lo que, a pesar de que en un principio, la construcción de los calentadores de biogás de estas características se plantea para zonas concretas del área rural de Bolivia, su utilización puede extenderse no solo a comunidades de condiciones similares, sino a otras muchas, siempre que se parta de condiciones que estén dentro del rango de utilización del modelo que se explicarán en su debido apartado.

Sin embargo hay que tener en cuenta ciertas limitaciones a las que estuvo sujeta la realización de este trabajo y que condicionan por tanto la exactitud en los resultados del modelo:

- En primer lugar hay que tener en cuenta que, dadas las condiciones en las que fueron llevadas a cabo las pruebas y los aparatos de medida utilizados, existe una gran incertidumbre en los datos recopilados, que lejos de proporcionarnos un resultado exacto, nos dan, al menos, una idea general de los valores que se deben obtener con el modelo. La finalidad del modelo es dar unas dimensiones siempre aproximadas de los elementos del calentador para unas condiciones dadas.
- El modelo final creado no está validado experimentalmente, así que a pesar de poder predecir unos resultados con base teórica y práctica para diferentes parámetros externos, no asegura que estos vayan a darse exactamente en la realidad. Por ello, aunque el modelo es capaz de calcular resultados muy similares para casos específicos (los de validación de los experimentos), queda pendiente su extrapolación para el resto de casos.

## 1.4. Herramientas

El proyecto se realiza utilizando tanto herramientas computacionales como pruebas experimentales para la construcción de un modelo válido en la práctica.

- Como herramientas computacionales destaca el uso de MATLAB para la resolución de los problemas numéricos así como para la creación del modelo. El análisis de los resultados experimentales fue llevado a cabo a través del Microsoft Excel. Y finalmente para la representación de los diferentes elementos del calentador se utilizaron los programas de dibujo de AutoCAD y CATIA V5.
- Para las pruebas experimentales se requirieron diversos elementos como carcasas, cabezales para el quemador, un serpentín de cobre, depósitos de biogás, etc. además de ele-

mentos más genéricos de fácil adquisición en tiendas (tubos metálicos, tuberías de PVC, válvulas de bola etc.). Para llevar a cabo las mediciones se utilizó un termómetro, un contador de gas y diferentes recipientes para líquidos. Todos estos elementos se describen detalladamente en el punto 5.

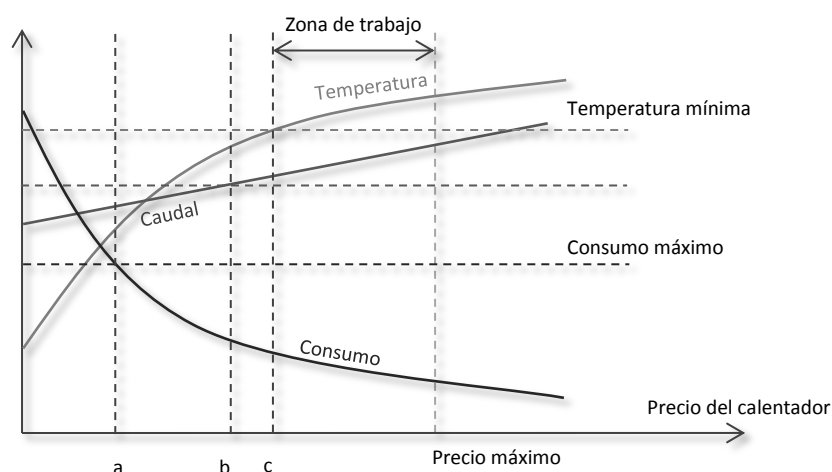
## 1.5. Objetivos del proyecto

La realización de este proyecto comprende el cumplimiento de una serie de objetivos que se detallan a continuación:

### Objetivo general

El objetivo principal de este estudio es el diseño y cálculo de un calentador de agua que pueda trabajar dentro de unos requerimientos mínimos en una comunidad rural sin que su construcción suponga un desembolso importante para las familias. Se entiende por tanto que el calentador en sí mismo deberá cumplir una serie de pautas:

- **Caudal mínimo.** El calentador deberá ser capaz de generar agua caliente sanitaria en cantidad suficiente como para abastecer al menos una ducha de forma continua. Los calentadores modernos de baja potencia son capaces de calentar un caudal de 6 L/min, sin embargo dadas las limitaciones a las que se verá sometido este calentador se considerará exitoso si es capaz de alcanzar para un caudal mínimo de 2 L/min, la temperatura de salida mínima establecida a continuación.
- **Temperatura de salida mínima.** Teniendo en cuenta las condiciones climáticas en las que se encuentran las comunidades del altiplano se considerará una temperatura de entrada de unos 15°C, y 19°C para la región subandina. La temperatura de salida del agua del calentador deberá de ser la suficiente para poder llevar a cabo tareas de higiene personal de forma confortable. Esta temperatura se considerará de unos 35°C.
- **Consumo de biogás máximo.** Este parámetro iba a depender de la capacidad productiva de biogás de cada comunidad. Dada la cantidad de biogás disponible cada día el calentador debería ser capaz producir agua caliente como para varias duchas. Haciendo los cálculos pertinentes el caudal de trabajo iba a estar comprendido entre 0,5 y 1,0 m<sup>3</sup>/h, lo cual supone un gasto de unos 500 a 1000 litros de biogás y una hora de producción de agua caliente sanitaria al día (unas 6 duchas).
- **Precio máximo.** En base a los precios de mercado para calentadores de gas de pequeño tamaño que se comercializan en Bolivia (más de 100 euros los que menos). Se quiso establecer un precio máximo para un calentador de unos 40 euros.



**Ilustración 1.1. Definición de los límites de trabajo. Fuente: Elaboración propia**

Tal y como se muestra en la ilustración 1.1 los dos primeros parámetros están relacionados directamente con el precio del calentador, mientras que el consumo inversamente. Es decir, cuanto más se invierte en el calentador (longitud del intercambiador, aislantes etc), mayor capacidad tendrá de

trabajar con caudales mayores, producir agua a mayor temperatura, o consumir menos. Con este trabajo se pretende buscar el punto óptimo en el que se cumplan las cuatro proposiciones. Es decir, el punto de la zona de trabajo en el que el precio sea mínimo. En el caso de que no exista zona de trabajo, por ejemplo, porque la línea de precio máximo se encuentre a la izquierda de la que determina el precio mínimo para obtener la Temperatura mínima, entonces el calentador no será factible. El calentador solamente será factible si las líneas de temperatura (c), caudal (b) y consumo (a) se encuentran a la izquierda de la línea de precio máximo. Por tanto definimos el objetivo fundamental del trabajo como diseñar un calentador que se encuentre dentro de los límites de trabajo establecidos.

### Objetivos específicos

En la realización de este trabajo y el cumplimiento del objetivo general, se encuentran implícitos una serie de objetivos más específicos que habrán de completarse:

- Análisis de los mecanismos de transmisión de calor involucrados en proceso general de producción de agua caliente sanitaria.
- Comprensión del funcionamiento de un calentador de gas doméstico y reducción de este a sus elementos más fundamentales.
- Creación de un modelo matemático con el que se obtengan de forma satisfactoria resultados similares a los obtenidos experimentalmente para los mismos parámetros de entrada y condiciones externas.
- Cálculo de los diferentes elementos de un calentador de bajo costo para las condiciones de los escenarios propuestos a partir del modelo matemático.
- Redacción de una breve guía para la construcción de este tipo de calentadores con información práctica obtenida directamente de las experiencias.

## 1.6. Planteamiento inicial

El problema que se intenta solventar con este trabajo parte de una necesidad. Esta necesidad se materializa en la producción de agua caliente sanitaria en una comunidad rural boliviana a partir de los recursos ya existentes. Se hace por tanto imprescindible conocer, al menos de forma genérica, el tipo de comunidad y de usuarios a los que este estudio pretende dar cobertura.

En la teoría se plantean dos escenarios diferentes, uno para el altiplano o región andina, y otro para la región subandina:

- Altiplano<sup>1</sup>: Familias formadas por unos 5 miembros y alrededor de 10 familias por comunidad. Se tomará una altitud media de 3600 msnm y clima frío. La temperatura diurna media será de 10°C en verano y 0°C en invierno.
- Región subandina<sup>2</sup>: Familias formadas por 5 miembros y alrededor de 10 familias por comunidad. La altitud se tomara de 2500 msnm y clima templado. La temperatura diurna media será de 25°C en verano y 10°C en invierno.

Se supondrá la disponibilidad de unos 500 litros de biogás al día para el Altiplano, y 600 para la región subandina. Aunque en último término esto depende de cada comunidad concreta, en la región subandina la producción de biogás es mayor debido a una mayor temperatura ambiente que en el altiplano. También el tamaño de los biodigestores difiere de una comunidad a otra.

Este planteamiento hipotético servirá como ejemplo en el punto 6 para el cálculo de las dimensiones reales de un calentador de este tipo a partir de los modelos calculados, así como para darnos un precio aproximado del sistema, pudiendo valorar de esta forma la viabilidad del producto. Aunque como se ha dicho, se pretende que tanto los modelos como la información aquí sea extrapolable a otros muchos escenarios.

<sup>1</sup> Esta zona se halla a más de 3.000 msnm, ubicada entre los dos grandes ramales andinos: las cordilleras Occidental y Oriental o Real (mapa físico ANEXO A), las que presentan algunas de las cumbres más elevadas de América. El clima en esta región es árido-polar barrido por los vientos fuertes y fríos. La temperatura media se encuentra entre los 15 a 20°C.

<sup>2</sup> En el centro-sur: región intermedia entre el altiplano y los llanos orientales que abarca el 13% del territorio. Se caracteriza por su actividad agrícola y su clima templado a cálido (15 a 25 °C)

### 1.7. Justificación del proyecto

Mucha de la información que se menciona en este punto de forma breve, se trata con mayor profundidad en el siguiente capítulo, por lo que se recomienda su lectura para una mejor comprensión de lo aquí explicado. Bolivia es un país muy poco poblado para la gran extensión de su territorio (apenas 6 habitantes por km<sup>2</sup>). La mayor parte de la población reside en las áreas urbanas, sin embargo, casi el 20%, continúa viviendo en comunidades del área rural. La principal característica de estos núcleos rurales es su gran dispersión y poca población. Además muchos de ellos se encuentran en áreas de difícil acceso en zonas de geografía complicada, prácticamente incomunicados y con economías precarias, casi de subsistencia. Esta situación complica la electrificación desde un sistema intercomunicado único, ya que no se justifican los costes que generaría el llevar la electricidad a lugares remotos salvo que supusieran un beneficio reseñable. La consecuencia es que apenas el 57% de esta población rural tiene acceso a la electricidad.

La falta de este servicio básico se traduce en un nivel de vida muy inferior al de la población urbana, haciendo cada vez más evidente la diferencia en el desarrollo entre las comunidades y el resto del país. Esta falta de acceso a la electricidad limita las actividades de la población rural y reduce su calidad de vida. En la actualidad se plantea a largo plazo la extensión del Sistema Interconectado Nacional a las comunidades más alejadas, sin embargo, la solución más factible pasa por la creación de mini-redes eléctricas aisladas con generación propia a partir de generadores diésel, o en el mejor de los casos apoyada por sistemas eólicos o fotovoltaicos, que den cobertura a los núcleos rurales más importantes. Pero el elevado coste inicial de estas infraestructuras limita en gran medida el uso de este sistema a las comunidades, que dentro del ámbito rural, disponen de un mayor poder adquisitivo. Hoy por hoy siguen existiendo una gran cantidad de comunidades cuya principal fuente de energía sigue siendo la biomasa.

Para estos últimos casos se plantea la construcción de biodigestores familiares de bajo coste, que no suponen una gran inversión y que, además de dar una salida higiénica a los desechos biológicos de la comunidad (la actividad principal es la agricultura y la ganadería), suministran un combustible fiable y seguro con el que sustituir hasta cierto punto, a la biomasa tradicional. Obviamente la eficiencia de los sistemas de producción y utilización de esta energía no está a la altura de la electricidad, sin embargo suponen una alternativa barata y a muy corto plazo por lo que resultan realmente útiles en un gran número de comunidades del área rural de Bolivia. Este tipo de biodigestores llevan estudiándose e implementándose en Bolivia y Perú desde los años 90 y se han conseguido grandes logros y avances con la difusión democrática de la tecnología. Las propiedades como combustible del biogás, de menor poder calorífico que otros gases, unido al bajo poder adquisitivo de sus usuarios, han dado lugar a un campo de investigación muy extenso en el área de su utilización. La principal aplicación que se ha dado al biogás en este tiempo y que ha ido de la mano con el desarrollo de los biodigestores de bajo costo ha sido la cocción de alimentos, así como la iluminación, o en el caso de grandes producciones, la generación de electricidad.

Sin embargo se ha planteado en estos últimos años el problema asociado a la falta de higiene en estas comunidades. La falta de higiene personal es, entre otros, un indicador negativo del índice NBI<sup>3</sup>, y lleva asociada una serie de consecuencias que empeoran de forma directa o indirecta a las personas afectadas:

- Proliferación de organismos nocivos para el ser humano, como piojos o bacterias
- Favorece la aparición de enfermedades cutáneas y bucales.
- Riesgo de exclusión social

Por todo ello la implementación de un sistema productor de ACS utilizando el biogás, se propone como una idea interesante, con salida directa y a corto plazo en estas comunidades con el fin de proporcionar una cantidad diaria de agua caliente destinada a erradicar este problema con los recursos actualmente disponibles.

<sup>3</sup> Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas

## 2. Antecedentes

---

Como se ha comentado, se pretende con este trabajo, realizar un estudio completo de diseño de un calentador de biogás de bajo costo. A efectos técnicos, supone la creación de un producto nuevo, y para ello siempre es necesario buscar la satisfacción de una necesidad.

Para contextualizar la creación de este calentador, es necesario comprender la realidad energética que se tiene actualmente en las comunidades del área rural de Bolivia. La cual es consecuencia de la realidad política, económica y social que vive el país, y que se resumen brevemente en este capítulo.

Por otro lado, dada la necesidad de buscar una fuente de energía que sustituya la biomasa tradicional en estas áreas a corto plazo, se ha procedido desde hace años a la instalación de biodigestores de bajo costo, lo que ha convertido al biogás en una alternativa energética en muchas comunidades de Bolivia.





## 2.1. Situación política

La complicada situación política de Bolivia proviene de una gran variedad de causas estructurales realmente complejas de analizar como son la extrema pobreza, la desigualdad y la exclusión social así como de la crisis de las instituciones del estado.

En los últimos años Bolivia ha vivido un resurgimiento de profundas divisiones en el sistema político tradicional, así como un alto grado de conflicto social, el cual se intensificó aún más tras los acontecimientos de octubre de 2003<sup>4</sup> que llevaron a la renuncia del presidente Sánchez de Lozada, su reemplazo por el Vice-presidente Carlos Mesa, y luego la presidencia de transición de Eduardo Rodríguez. Los sucesivos gobiernos fueron incapaces de satisfacer las demandas de una serie de movimientos populares, especialmente aquellos dirigidos por la población indígena. Esto dio lugar a una radicalización de las posiciones e hizo imposible alcanzar acuerdos duraderos, sobre todo en temas que afectan el futuro inmediato de Bolivia como la Asamblea Constituyente, el proceso de descentralización y la distribución justa de la riqueza derivada de los recursos naturales del país, especialmente hidrocarburos.

La victoria de Evo Morales en diciembre de 2005 cambió profundamente el contexto político boliviano. El resultado electoral expresa el deseo de la mayoría de la población de un cambio profundo y, al mismo tiempo, que se ponga fin a la inestabilidad política. Sin embargo, la implementación de la agenda del Gobierno ha acentuado las tensiones, en particular con respecto a las cuestiones de autonomía regional y reforma agraria, a su vez refleja un electorado cada vez más polarizado entre los lados este y oeste del país.

La elección de la Asamblea Constituyente y el referéndum autonómico del 2 de julio 2006 marcó el comienzo de una nueva fase en el proceso democrático boliviano. Las cuestiones clave llevada a cabo por la Asamblea Constituyente de agosto de 2006 en adelante incluyen el establecimiento de un modelo económico nuevo y más equitativo, la inclusión social, política y económica de la población indígena (incluyendo un posible retorno a las formas tradicionales de justicia comunitaria y organización política), la reforma agraria, la distribución de las regalías energéticas y mineras y los impuestos, y la descentralización regional.

El sistema legal de Bolivia es independiente de los otros poderes del Estado. A pesar de ello, su eficacia se ha visto obstaculizada por la corrupción y la falta de recursos. El Gobierno actual ha puesto de relieve su compromiso de hacer frente a estos problemas. Sin embargo continúa existiendo un grave problema de falta de igualdad de oportunidades en el acceso y tratamiento por parte del sistema legal, sobre todo, para los ciudadanos más pobres. Las elecciones se celebran regularmente y de conformidad con las normas internacionales.

En 2006 se comienza a redactar una nueva Constitución. Tras una profunda crisis política que polariza el país entre partidarios del Gobierno (principalmente en el occidente) y seguidores de las demandas de autonomía departamental y capitalía para Sucre (en el Oriente Boliviano), la Constitución Plurinacional es aprobada por 164 de los 255 asambleístas y posteriormente modificada por el Congreso y llevada a referéndum. A fines de 2009, Evo Morales del MAS<sup>5</sup> es reelecto Presidente con más de dos tercios de mayoría legislativa.

Finalmente, el 9 de febrero de 2009 la nueva constitución fue promulgada por el presidente Evo Morales en un multitudinario evento en la ciudad de El Alto. En el juramento, Morales dio su misión «por cumplida» pronunciando la siguiente frase:

*"Algunos grupos permanentemente intentaron sacarme del Palacio. Ustedes saben, algunos grupos permanentemente intentaron matarme. Ahora quiero decirles: pueden sacarme del Palacio, pueden matarme, misión cumplida con la refundación de una nueva Bolivia unida"*

<sup>4</sup> Los acontecimientos de octubre de 2003 se refieren a la conocida como Guerra del Gas. La Guerra del Gas es el nombre popular de una disputa social en Bolivia, centrada en la explotación de las reservas de gas natural que se descubrieron en el departamento de Tarija, a mediados de la década de 1990 y catalogadas conjuntamente como el segundo Yacimiento más grande de Sudamérica.

<sup>5</sup> En 1987 una línea de izquierda de la Falange Socialista Boliviana seguidora de David Añez Pedraza se escinde formando el partido Movimiento al Socialismo-Unzaguista (MAS-U). El MAS-U en su origen pretendió dar coherencia a las reivindicaciones de los cocaleros, cultivadores de la planta sagrada en las culturas andinas pero a medida que estos gobiernos se fueron haciendo más permeables a las exigencias indígenas, sus tesis fueron dando paso a su actual doctrina de izquierda, también llamado "capitalismo de estado andino"

## 2.2. Situación económica

A pesar de que Bolivia cuenta con un extenso territorio y abundantes recursos naturales, tiene una de las economías más pequeñas de América Latina, con un PIB de 9,3 mil millones de dólares. Es el país más pobre de América del Sur, con un ingreso anual per cápita de sólo 1010\$ en 2005. Bolivia sigue siendo altamente dependiente de la explotación de los recursos naturales. La agricultura, así como la minería y los hidrocarburos suponen más del 40% de la actividad económica y casi el 80% de las exportaciones. A pesar de una serie de reformas en la década de 1990<sup>6</sup>, los mercados de consumo interno, trabajo y los recursos de capital siguen siendo pequeños. Esta situación se debe en parte a una población relativamente pequeña y dispersa, bajos niveles de ingresos, unos índices de desarrollo humano bajo, falta de infraestructura e instituciones poco eficientes. Además, desde finales de la década de 1990, Bolivia se ha visto afectada negativamente por los desequilibrios económicos a nivel mundial y regional que ha resultado en casi cinco años de recesión interna.

Desde 2003, la economía ha mostrado signos de recuperación. El crecimiento económico alcanzó el 3,6% en 2004 y 4% en 2005, ambas cifras consideradas suficientes para mantenerse a la par con las tasas de crecimiento de la población y producir pequeños incrementos en los ingresos per cápita. Las exportaciones se incrementaron en más de un 30% en 2004, 25% en 2005 y otro 42% en 2006, ayudado por condiciones externas favorables. Sin embargo, este aumento de las exportaciones no ha conducido a ninguna generación significativa de empleo. El déficit fiscal se redujo del 8,1% del PIB en 2003 al 1,6% en 2005 y en 2006 se registró un superávit de alrededor del 5% del PIB. Esto se logró por medio de un "plan de austeridad" que supuso una reducción significativa en el gasto del Gobierno central, sin comprometer seriamente a los sectores políticos más sensibles (salud, educación y pensiones), el aumento de los ingresos fiscales, en particular gracias al nuevo impuesto sobre la producción de hidrocarburos, y el apoyo especial en 2004 por la comunidad internacional para el presupuesto nacional.

Hay mayores dificultades a nivel microeconómico. Las principales actividades de exportación (en valor) no generan una cantidad importante de empleo, a pesar de que la pequeña minería puede en el futuro ayudar a crear un cierto número de puestos de trabajo no cualificados. Además, a medio plazo, los principales mercados - Comunidad Andina y Mercosur - pueden verse reducidos debido a la erosión de las preferencias como resultado de los acuerdos comerciales bilaterales entre los países socios. La mayoría de los sectores aún no se han recuperado de la caída de la demanda interna y no están en condiciones de mejorar su competitividad para poder acceder a los mercados externos cada vez más estrechos.

El desempleo y el empleo sumergido han aumentado continuamente en los últimos cinco años, fomentando la migración interna y externa. El desempleo afectaba a 2007 actualmente a 11% de la fuerza de trabajo y el sector informal representa más del 65% de la actividad económica, proporcionando fuentes de empleo marginal y empleando un gran porcentaje de los adultos en edad de trabajar, e incluso a los niños en edad escolar. Con pocas excepciones, las principales características de este empleo sumergido, que incluye la actividad agrícola y ganadera, especialmente en áreas rurales, a pequeña escala son: la baja productividad y productos de mala calidad, que limitan las posibilidades de crecimiento. Por otra parte, la notable capacidad del sector informal para adaptarse a las cambiantes circunstancias económicas ha garantizado tradicionalmente la supervivencia de un gran número de familias en los momentos de crisis.

A la luz de lo anterior, junto con un prudente manejo de la cuestión fiscal, los mayores desafíos para Bolivia en el campo económico están en la creación de puestos de trabajo, la promoción de las oportunidades económicas y la generación de ingresos, así como la formalización de la economía sumergida, el aumento de la productividad y la competitividad en todos los niveles. Al mismo tiempo, es necesario que haya una distribución más justa de los beneficios del crecimiento entre los grupos de población más vulnerables, mediante la promoción y el fortalecimiento de las políticas nacionales de reducción de la pobreza.

<sup>6</sup> Ley de Bancos y Entidades Financieras; la Ley del Banco Central de Bolivia; la Ley de Participación y crédito Popular; las leyes comprendidas en el marco del sistema de pensiones, seguros y valores; y, de manera complementaria, la evolución de la Normativa de Evaluación y Calificación de Cartera

## 2.3. Situación social

Bolivia sufre de graves problemas de pobreza y exclusión social, que afecta sobre todo a la mayoría indígena de la población. El grupo étnico y el lugar de origen de una persona, tienen una fuerte influencia en las posibilidades de movilidad social y en las oportunidades disponibles. Por otra parte, los modelos basados en la sociedad occidental no son necesariamente compartidos por los sectores que se identifican con los valores y el comportamiento de las culturas andinas.

Las desigualdades socioeconómicas profundas que han marcado la historia de Bolivia, y la consecuente exclusión de los pobres, la población indígena y los mestizos de los beneficios del desarrollo, han llevado a una situación de pobreza crónica. Bolivia, con un índice de desarrollo humano (0,687), estaba clasificado en el puesto 115 de los 177 países en el mundo en 2005<sup>7</sup>. El 64% de la población se veía afectada por la pobreza en 2004<sup>8</sup>. Y según el Banco Mundial, se estima que el índice de Gini<sup>9</sup> ha aumentado de 52 a 62 entre 1985 y 2003.

Aunque tradicionalmente la pobreza se concentra principalmente en las zonas rurales, el fenómeno se ha ido extendiendo cada vez más a las zonas urbanas debido a la migración interna. Para la mayor parte de la gente pobre en Bolivia, el ir y venir entre los que viven en zonas rurales y la búsqueda de un empleo remunerado en las ciudades contribuye al mantenimiento de las redes tradicionales andinas de reciprocidad. En cuanto a la migración fuera de Bolivia, ésta ha ido en aumento desde hace varios años, con un máximo de 2,3 millones de bolivianos viviendo en el extranjero.

Reconociendo esta situación, en la segunda mitad de la década de los noventa, Bolivia dio prioridad a los programas para resolver la situación social. Se hicieron esfuerzos para lograr un mayor nivel de cobertura de servicios, saneamiento, educación, y salud, con resultados positivos, aunque insuficiente. En materia de salud, en 2001 la tasa de mortalidad materna en Bolivia fue de 420 por 100.000 nacidos vivos, la tasa más alta de toda América Latina. La tasa de mortalidad infantil se redujo de 89 por 1.000 nacidos vivos en 1990 a 54 en 2004. Entre 1994 y 2003, la proporción de partos atendidos por personal de salud cualificado aumentó del 47% a 67%. En el sector de la educación, la matriculación en la escuela primaria se ha mantenido constante en 95%, sin un aumento significativo desde 1998. La tasa de alfabetización de adultos en Bolivia es la más baja en la región.

A pesar de que la cobertura ha mejorado en la prestación de servicios, educación, salud y saneamiento, se mantiene la preocupación con respecto a la calidad y la sostenibilidad, así como del acceso equitativo, tanto geográfica como socialmente. En el marco del Plan Nacional de Desarrollo, el Gobierno propone aumentar la participación de las organizaciones comunitarias locales para que, a través del "control social", los servicios sociales sean más responsables ante los usuarios finales. Además, el Gobierno se propone una revisión crítica de los procesos de reforma existentes en los sectores sociales.

Las grandes disparidades existentes entre zonas urbanas y rurales suponen que las zonas rurales, que tienen un menor acceso a todos estos servicios, sufran las condiciones más precarias. Esto ha dado lugar a importantes flujos migratorios internos y externos, incluyendo a las áreas de producción de coca. Las redes sociales y las organizaciones tradicionalmente establecidas están siendo sobrepasadas por la migración, lo que lleva a un aumento de la delincuencia urbana. Los emigrantes internos son especialmente vulnerables a la exclusión social, especialmente en el ámbito del empleo.

## 2.4. Situación energética

La realidad energética actual boliviana pone de manifiesto las graves desigualdades de las que se viene hablando hasta ahora. Mientras que las áreas urbanas como La Paz y Santa Cruz gozan de un relativamente buen suministro de servicios energéticos modernos, la mayoría de las zonas rurales

<sup>7</sup> Informe sobre Desarrollo Humano 2006, UNDP

<sup>8</sup> Según datos del Informe Económico y Social publicada por UDAPE y el Ministerio de Desarrollo Económico en 2005.

<sup>9</sup> El coeficiente de Gini es una medida de la desigualdad ideada por el estadístico italiano Corrado Gini. Normalmente se utiliza para medir la desigualdad en los ingresos, dentro de un país, pero puede utilizarse para medir cualquier forma de distribución desigual. El coeficiente de Gini es un número entre 0 y 1, en donde 0 se corresponde con la perfecta igualdad (todos tienen los mismos ingresos) y donde el valor 1 se corresponde con la perfecta desigualdad (una persona tiene todos los ingresos y los demás ninguno).

de Bolivia siguen experimentando una falta de la mayoría de los servicios básicos, incluido el acceso confiable y asequible a la electricidad.

En el campo energético, desde el año 2005 el actual gobierno ha procedido a la nacionalización de la industria del gas natural (GN) y el petróleo, paralelamente se ha estudiado la aplicación de un nuevo modelo económico que intenta buscar la equidad y responsabilidad estatal con una mayor presencia del Estado en todos los sectores económicos y sociales del país.

Así, Bolivia experimenta un proceso de redefinición de sus vínculos con la economía mundial y de reorganización de su estructura productiva, incorporando al Estado en la economía con un rol más protagonista que solamente el de orientador como el que desempeñaba en el pasado.

Sin embargo ésta es sólo una parte del escenario, que viene a ser complementado por la realidad de un área rural con una población dispersa, inconexa y aislada y marginada del mercado energético nacional, que representa casi un 40% de la población del país con índices de desarrollo por debajo de los niveles aceptados mundialmente.

En el área rural el abastecimiento de los hidrocarburos es muy escaso, particularmente el del Gas Licuado de Petróleo (GLP). De amplio uso a nivel urbano, el GLP sólo está presente en los centros rurales más importantes, mientras que en el resto del territorio nacional sencillamente no existe disponibilidad de este combustible. El principal recurso energético en estas áreas dispersas y alejadas es la biomasa, que en promedio cubre el 80% de la demanda total rural de energía (hay algunas zonas donde este recurso cubre hasta el 97% de esta demanda, situación que no ha cambiado en los últimos 13 años). Los consumos en electrificación rural alcanzan en promedio apenas el 25 kWh/mes por familia y la media se posiciona en 32 kWh/mes por familia, una cantidad de energía que solamente permite un uso limitado de la iluminación y la radio, así como de algunas horas de televisión.

#### 2.4.1. Balance energético de Bolivia<sup>10</sup>

En Bolivia, la producción de energía primaria se origina fundamentalmente a partir de cuatro recursos: gas natural, petróleo, GLP, gasolina natural, biomasa e hidroenergía. Para el año 2010 la producción de energía primaria alcanzó los 113524,68 kbep<sup>11</sup>, lo que supuso un incremento del 14% sobre la producción de energía primaria del año anterior. De este total, 90414,84 kbep, correspondió a la producción de gas natural.

FUENTE	2009	2010	Variación (%)
Petróleo, GLP y Gasolina Natural	14718,58	15355,79	+4
Gas Natural	77285,89	90414,84	+17
Hidroenergía	1422,35	1346,83	-5
Biomasa	6162	6407,23	+4
TOTAL	99589,78	113524,68	+14

**Tabla 2.1. Producción de energía primaria. Fuente: Balance Energético Nacional 2000-2010**

La producción de hidrocarburos representa el 93% de la producción total de energía, de los cuales 80% corresponde a la producción de gas natural.

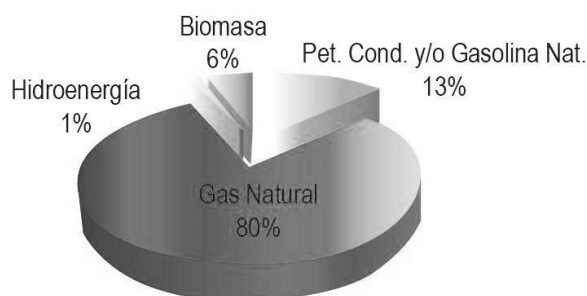
Durante la gestión 2010, se exportaron 72029,58 kbep de energía de los cuales 69468,51 kbep correspondieron a gas natural y 2561,07 a crudo reconstituido. En 2010, se importaron 5212,88 kbep de energía, de los cuales 4391,25 kbep correspondieron a diésel-oil, y el resto a otros derivados como ser gasolina especial, GLP, gasolina de aviación y aceites y grasas.

Teniendo en cuenta la energía ingresada a los centros de transformación, en 2010, hubo un 5,8% más de ingreso de energía que en la gestión anterior. La energía ingresada en los Centros de Transformación alcanzó en 2010 a 28000,98 kbep, de los cuales 15571,14 kbep, correspondieron a Refinerías, 2086,53 a Plantas de Gas y 10343,32 kbep a Centrales Eléctricas. La mayor proporción

<sup>10</sup> MHE. Balance Energético Nacional 2000-2010

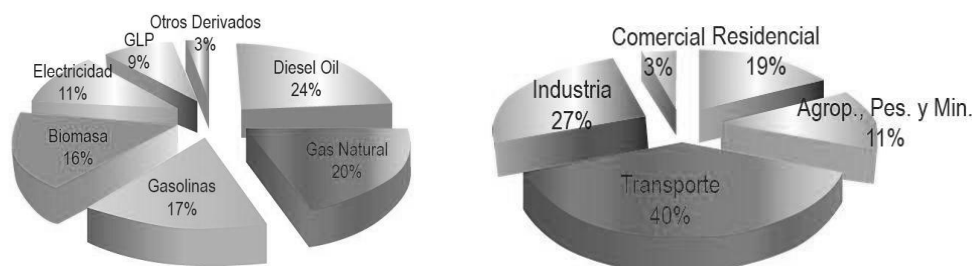
<sup>11</sup> bep. Barril Equivalente de Petróleo. Unidad energética empleada para homogeneizar las diferentes unidades físicas. El valor se basa en los factores caloríficos del país según su calidad y composición.

ingreso de energía a las Centrales Eléctricas, correspondió a las Termoeléctricas con 8518,91 kbp, seguidas por las hidroeléctricas 1346,83 kbp y finalmente por la biomasa con 477,58 kbp y aceites y grasas.



**Ilustración 2.2. Estructura de la Producción de Energía Primaria. Fuente: Balance Energético Nacional 2000-2010**

Teniendo en cuenta la estructura del consumo final de energía por fuentes, para la gestión 2010, el diésel-oil se constituye en la principal fuente de consumo energético, seguido por el gas natural, gasolina, biomasa y electricidad.



**Ilustración 2.3. Estructura de consumo final de energía por fuentes (izqda.) y por sectores (dcha.) Fuente: Balance Energético Nacional 2000-2010**

Comparando el consumo final de energía por sectores, los sectores de mayor crecimiento fueron los sectores comercial, de Transporte y el sector de agropecuario, pesca y minería.

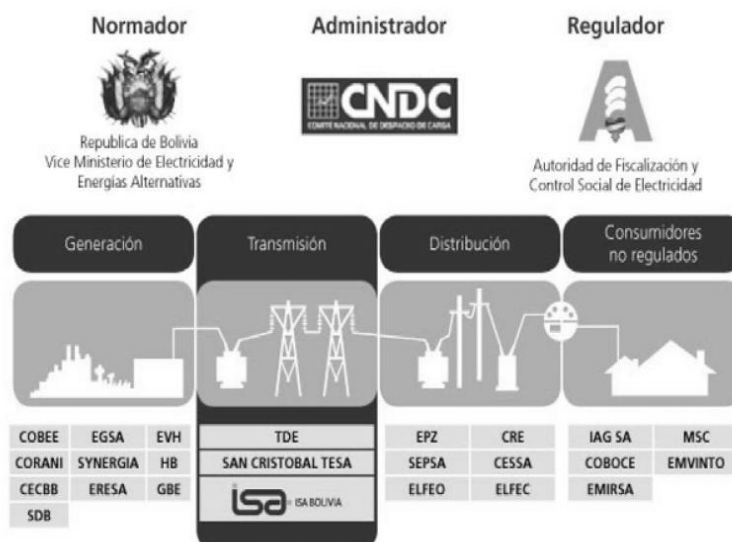
El consumo de energía en el sector industrial creció en 3% entre 2009 y 2010. Entre los energéticos más consumidos por el sector industrial, se encuentran el gas natural, la biomasa y la electricidad. Otras fuentes energéticas para la industria lo constituyen el diésel oil, GLP y keroseno. El consumo de energía en el sector residencial creció en 6% entre 2009 y 2010. Entre los energéticos más consumidos por el sector residencial, se encuentran el GLP, la biomasa y la electricidad. Otras fuentes energéticas para el sector residencial lo constituyen el gas natural y el kerosene. Cabe destacar las tasas de crecimiento registradas en el consumo de gas natural y la electricidad entre ambas gestiones. El consumo de energía en el sector comercial creció en 16% entre 2009 y 2010. Entre los energéticos más consumidos por el sector comercial, se encuentran la electricidad y el gas natural. Otra fuente energética para el sector comercial lo constituye el gas licuado de petróleo, que registró tasas de crecimiento menores a los registrados con la electricidad y el gas natural. El consumo de energía en el sector agropecuario, pesca y minería creció en 11% entre 2009 y 2010. El energético más consumido por este sector, es el diésel oil, seguido por la electricidad.

## 2.4.2. El sector eléctrico

El sector eléctrico en Bolivia fue privatizado a principios de los años 90 y se dividió en generación, transmisión y distribución. Estas tres etapas se desarrollaron en los dos grupos de sistemas eléctricos reconocidos en la Ley de Electricidad: el Sistema Interconectado Nacional (SIN), que de forma unificada provee de energía eléctrica a las principales ciudades del país, y los sistemas aislados y autoprodutores, que proveen de energía eléctrica a las poblaciones más pequeñas.

La generación del SIN es de tipo hidroeléctrico o térmico fundamentalmente y la generación de los sistemas aislados es hidroeléctrica, de turbina de gas, de motor de gas o de motor diésel.

El SIN fue construido en el año 1965 al conectar las redes de transporte de Cochabamba<sup>12</sup> y Oruro. El sistema fue ampliado posteriormente con la inclusión al mismo de los centros urbanos de La Paz, Potosí, Oruro, Cochabamba y Sucre. La configuración actual incluye a Santa Cruz, la cual se conectó en la década de los 80. La función prioritaria del SIN es la de suministrar energía eléctrica a las zonas urbanas e industriales (principalmente) en los departamentos de La Paz, Santa Cruz, Cochabamba, Oruro, Potosí y Chuquisaca. En cuanto a la generación eléctrica de cada área, en la zona Norte predominan las centrales hidroeléctricas mientras que las termoeléctricas son las más habituales en el oriente. Cabe destacar que la legislación boliviana prohíbe a las empresas desempeñar más de una de las tres funciones (generación, transporte y distribución).



**Ilustración 2.4. Instituciones Bolivianas de administración y regulación, y empresas participantes en el SIN.** Fuente: Autoridad de Fiscalización y Control Social de Electricidad de Bolivia

Los sistemas aislados se encuentran ubicados, principalmente, en los departamentos y ciudades donde el SIN no llega, como por ejemplo Tarija, Trinidad o Cobija.

La principal diferencia entre el SIN y los sistemas aislados desde el punto de vista organizativo es que cada empresa puede desempeñar más de un papel en el proceso global. Generalmente, cada empresa suele ocuparse tanto de la generación, transporte como de la distribución en un mismo sistema aislado. Los operadores más importantes son SETAR, ENDE y CRE. Los sistemas aislados sirven, generalmente, para abastecer a comunidades aisladas, cooperativas o empresas mineras.

### 2.4.3. La energía rural

El acceso a la electricidad en Bolivia presenta, como se ha comentado, grandes contrastes entre las áreas urbanas y rurales. En general, en Bolivia el 84% de la población tiene acceso a la electricidad. Sin embargo muestra de estos contrastes es que en las zonas urbanas el 99% de la población cuenta con electricidad mientras que en zonas rurales solamente el 57% de la población tiene acceso.<sup>13</sup>

El suministro de electricidad mediante la red eléctrica en áreas rurales está asociado a costes muy elevados debido a las grandes distancias de tendido eléctrico que es preciso instalar. Además aún se incrementarán más los costes cuanto mayor sea la irregularidad del terreno. En muchos casos, las áreas rurales se encuentran muy alejadas de la red eléctrica, en un entorno geográfico difícil y presentan un consumo eléctrico bajo, por lo que no se justifica económicamente la extensión de la red eléctrica.

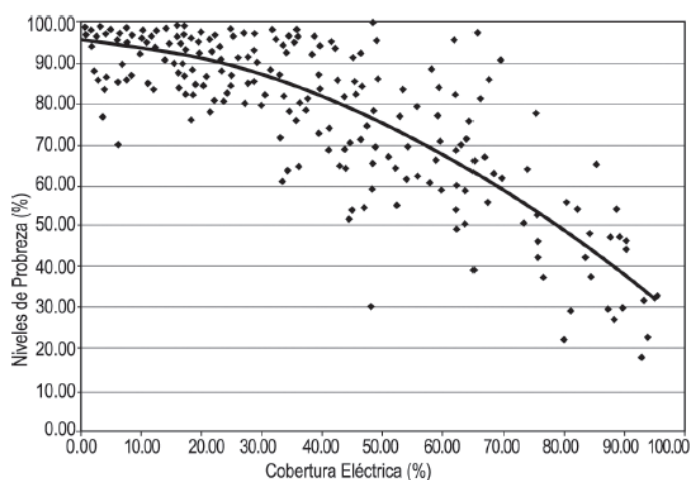
Sin embargo resulta fundamental una fuente de energía para promover el desarrollo de estas zonas. En el ámbito rural boliviano existe una estrecha relación entre pobreza y falta de acceso a la electricidad. En este sentido y utilizando el criterio de medición de la pobreza en Bolivia basado en las

<sup>12</sup> Mapa político de Bolivia y sistema interconectado en ANEXO A

<sup>13</sup> Datos del INE (Instituto Nacional de Estadística) de Bolivia del año 2008



Necesidades Básicas Insatisfechas<sup>14</sup> (NBI), se observa que el número de hogares rurales en condiciones de pobreza extrema es muy próximo al número de hogares en el área rural que no cuentan con energía eléctrica, lo que implica que el 90,17% de hogares sin energía eléctrica del área rural corresponden a hogares en situación de pobreza extrema (indigencia y marginalidad).



**Ilustración 2.5. Municipios Bolivianos y relación cobertura eléctrica-pobreza. Fuente: Análisis de la demanda de electrificación rural. Energética. 2005; INE 2001; Reportes de NBI**

En el análisis urbano-rural, es importante visualizar la diferencia que existe en la oportunidad del acceso a energías económicas. Las ciudades más grandes en Bolivia tienen un abastecimiento regular de GLP, GN, combustibles líquidos y electricidad, mientras que en el área rural la llegada de estos energéticos es poco menos que fortuita, e incluso impensable en muchos casos.

FUENTE	Urbano	Rural
Biomasa	0,27	5,01
Diésel/Queroseno	0,15	0,22
GLP	1,49	0,12
Electricidad	1,38	0,02
Total BEP/año (consumido)	3,29	5,36
Total BEP/año (energía útil)	1,93	0,65

**Tabla 2.2. Diferencias de patrones de consumo energético entre una familia rural y una familia urbana. Fuente: Energía y Desarrollo Sustentable en ALAC. Estudio de caso de Bolivia. OLADE, CEPAL, GTZ. 1997.**

Es posible observar en la tabla 2.2 que unas fuentes suministran energía térmica, mientras que otras proporcionan iluminación y comunicación. El área urbana centra su suministro energético en la electricidad y el GLP (ambas representan el 87% del consumo total), mientras que en el área rural la mayor importancia está en la biomasa (93%) y en el diésel/queroseno (4%).

Al comparar el consumo en el área urbana y rural de una misma fuente energética, se tienen diferencias apreciables, pues mientras el consumo de biomasa de una familia rural es 19 veces más respecto a una familia urbana, para el caso del GLP una familia urbana consume 12 veces más que su homóloga rural. Finalmente en el caso de la electricidad, una familia urbana consume 86 veces más energía eléctrica que una familia rural.

De los totales de la se observa que el volumen total de energéticos consumidos por una familia rural es 1,6 veces mayor que el que consume una familia urbana. Sin embargo, cuando se analizan los rendimientos de los energéticos y se calcula la energía útil que emplea cada familia, la relación se invierte: una familia urbana dispone de tres veces más energía útil que una familia rural. Esta situa-

<sup>14</sup> Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) es un método directo para identificar carencias críticas en una población y caracterizar la pobreza. Usualmente utiliza indicadores directamente relacionados con cuatro áreas de necesidades básicas de las personas (vivienda, servicios sanitarios, educación básica e ingreso mínimo), disponibles en los censos de población y vivienda.

ción muestra la indigencia energética rural que existe como consecuencia del empleo de tecnologías energéticas ineficientes.

Este hecho ratifica que el sector rural está prácticamente marginado de los sistemas convencionales de energía, pues si bien el GLP y la electricidad han empezado a penetrar en el mercado rural, aún tropiezan con la barrera de la dispersión y la falta de acceso. Además los ingresos económicos en el área rural son mucho más bajos que los del área urbana, lo que se constituye en una limitante para el consumo de estos recursos.

A pesar de los grandes esfuerzos realizados por el gobierno y los donantes extranjeros para mejorar el acceso a la electricidad, la mayoría de la población rural pobre carece de acceso a la energía moderna para cubrir sus necesidades básicas. Cerca del 70 % de la población tiene que depender de la biomasa, madera o estiércol, para sus cubrir sus demandas energéticas.

Las familias rurales perciben problemas respecto al uso tradicional de estos recursos energéticos:

- La menor disponibilidad en el acceso;
- El incremento de las distancias para conseguir el recurso;
- La falta de medios necesarios de transporte.

También se hace notar que la actividad de recolección de leña es un trabajo excesivo, al que hay que dedicarle mucho tiempo. Por otra parte, el uso extensivo de la madera para cocinar está dando como resultado la deforestación y los problemas ambientales relacionados a ello, ya que a menudo su explotación no está manejada de forma sostenible.

El impacto ambiental del uso de leña también se presenta en el interior de las viviendas rurales, como una contaminación *in-door*. Mediciones sobre la presencia de monóxido de carbono e inquemados (producto de la combustión de la leña) que han sido realizadas en hogares rurales de Bolivia, muestran que en el país se sobrepasan hasta en seis veces los niveles definidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como peligrosos.

## 2.5. Biogás. La alternativa económica a corto plazo

Con todo ello se pueden deducir unas conclusiones muy genéricas que nos llevarán a analizar el biogás como alternativa energética a corto plazo más viable en las comunidades aisladas para sustituir las formas de energía más tradicionales o en el mejor de los casos proporcionar mejores condiciones de vida a sus habitantes.

Las principales actividades llevadas a cabo por los habitantes de las áreas rurales son actividades de economía sumergida, siendo las más importantes la agricultura y la ganadería. Las cuales por un lado producen un reducido nivel de beneficios económicos, al mismo tiempo que generan una gran cantidad de residuos orgánicos que, de no ser tratados, pueden llegar a convertirse en un auténtico problema ecológico comprometiendo la seguridad de las personas. Vemos que el acceso a la electricidad sigue siendo un tema pendiente en Bolivia, hecho que se hace aún más acusado en zonas rurales, y que la ausencia de acceso a la red eléctrica está directamente relacionada con la pobreza ya que limita sus actividades y su nivel de vida. Por último, se comprueba que las principales fuentes de energía utilizadas actualmente en áreas rurales son la biomasa, de baja eficiencia energética y perjudicial para las personas, y los combustibles derivados del petróleo (GLP, diésel, queroseno), utilizados para la generación de electricidad a baja escala mediante grupos diésel. Aunque en el caso de ser accesibles (lo que no siempre es posible) suponen una alta inversión inicial, así como un continuo gasto para la compra del combustible.

En esta situación se hace especialmente útil la generación de biogás, ya que se solventa la mayor parte de estos problemas de forma simultánea:

- a) La construcción y mantenimiento de un biodigestor supone un coste inicial relativamente bajo, unos conocimientos mínimos y unos materiales bastante cotidianos. De esta forma se trata de una tecnología accesible para personas con un bajo nivel de vida (educativo y económico).
- b) El biogás se produce por la degradación anaerobia de la materia orgánica. La principal materia prima para la producción de biogás es el estiércol fresco, aunque puede usarse casi cualquier material orgánico susceptible de degradarse. Por tanto, la carga del biodigestor, es material orgánico mezclado con agua para favorecer su paso por el biodigestor. Es de-



cir, las heces del ganado y los restos de materia orgánica diversa se convierten en un combustible abundante y gratuito disponible en casi cualquier comunidad, con lo que sus habitantes evitarían el gasto continuo y la dependencia de una energía externa.

- c) Se soluciona el problema de contaminación ambiental que genera el estiércol sin tratar y que puede llegar a poner en peligro la salubridad de las fuentes de agua cercanas. Se eliminan así mismo los olores y las moscas. También es importante recordar la cantidad de enfermedades respiratorias que sufren, principalmente las mujeres, por la inhalación de humo al cocinar en espacios cerrados con leña o bosta seca. La combustión del biogás no produce humos visibles y su carga en ceniza es infinitamente menor que el humo proveniente de la quema de madera.
- d) La carga de mezcla diaria de estiércol con agua que se introduce al biodigestor será digerida por las bacterias y se producirá biogás. Pero por otro lado quedará un líquido ya digerido, que ha producido todo el biogás que podía, y que se convierte en un excelente fertilizante. Este fertilizante se conoce generalmente como biol. Se ha comprobado que aumenta el rendimiento de las cosechas, por lo que se puede utilizar para los cultivos propios o para comercializar.
- e) El biogás tiene diferentes aplicaciones que se comentarán más adelante entre ellas, la de producir electricidad con motores generadores de pequeñas dimensiones. Esta puede ser una alternativa a las instalaciones familiares fotovoltaicas, de menor coste (sumando biodigestor y generador) y de mayor alcance al añadir gas para cocinar y fertilizante para los cultivos.



*Ilustración 2.6. Biodigestor familiar (izqda.) y cocinilla de biogás (dcha.)*

### 2.5.1. La tecnología en Bolivia<sup>15</sup>

Los Biodigestores en Bolivia, así como todos los procesos y factores inmersos en su uso y aprovechamiento, es una tecnología reciente que tuvo sus primeros avances en la década de los noventa a cargo de la Universidad Mayor de San Simón por medio del Proyecto Biogás con financiamiento de la Cooperación Alemana (GTZ).

Pese al enfoque y prioridades asumidas por este proyecto (GTZ cooperación Alemana 1990-1995 Cbba, Bolivia) para el desarrollo y aplicación de los biodigestores como alternativa de solución al problema energético y de manejo de residuos sólidos, de poblaciones rurales pobres o marginales (donde la generación de energía de bajo costo para uso doméstico a partir de insumos disponibles en la zona constituyen la base de las acciones), no se lograron obtener resultados significativos en lo que se refiere a la tecnología de instalación de los dispositivos en los que se llevan a cabo todos los procesos químicos de la biodigestión.

Los componentes y materiales utilizados por el Proyecto Biogás GTZ para la instalación de los sistemas incrementó los costos a niveles inaccesibles para la población, situándose como una iniciativa eminentemente de investigación pero sin resultados prácticos que demuestren la viabilidad integral de su aplicación en la solución de problemas concretos.

No se pueden negar los avances científicos conseguidos por este proyecto inherentes a la operación en sí de los biodigestores en Bolivia, estudio del uso y aplicación de subproductos, etc., generando una base de datos muy útil para mejorar el desarrollo de esta tecnología), pero tampoco se puede

<sup>15</sup> Guía de biodigestores familiares, Jaime Martí

afirmar que el proyecto realizado por la GTZ en Bolivia haya conseguido un impacto valorable relacionado con sus objetivos y metas.

En resumen, esta fue la única experiencia importante a nivel nacional, en el uso de los Biodigestores pero sin éxito concreto en su aplicación a nivel de la problemática social.

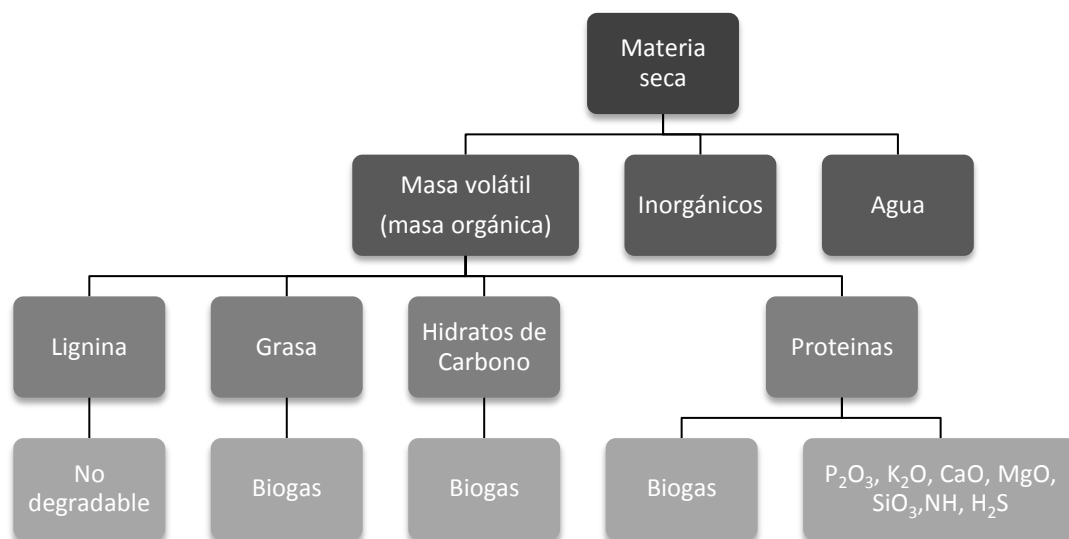
Posteriormente, a partir del año 2001 la ONG “Tecnologías en Desarrollo” pone en marcha una iniciativa piloto consistente en la implementación de biodigestores bajo la modalidad de promoción de energías renovables y manejo integral de los residuos sólidos enfocada a zonas rurales con algún tipo de limitación o deficiencia que afecta uno o varios de los factores relacionados con la calidad de vida.

Los aspectos identificados y priorizados por Tecnologías en Desarrollo como pilares de la estrategia de acción se centraron en:

- El concepto de energización rural como apoyo directo a los esfuerzos locales por resolver problemas que limitaron el desarrollo integral. Este aspecto primo en la experiencia piloto.
- La inclusión de aspectos relacionados con la salud familiar, higiene y salubridad del ambiente doméstico. Aspecto que se concretó a través de la instalación de letrinas de bajo costo operadas en conexión directa con los biodigestores.
- El concepto de manejo productivo eficiente y calidad ambiental. Donde los biodigestores son considerados como la base fundamental para promover estos aspectos a través de su influencia sobre las modalidades tradicionales de cría de ganado, disposición de desechos orgánicos, uso eficiente de insumos naturales para la agricultura, lo que repercute de alguna manera en sobre el cuidado del medio ambiente doméstico.

A partir de estos pilares se mejoró el esquema tecnológico general de los biodigestores (procesos, equipos, materiales, técnicas de instalación), así como los mecanismos de control y evaluación de productos, y los inherentes al impacto social.

Es importante recalcar la adaptabilidad que ha tenido esta tecnología en Bolivia, pues se ha logrado como en ningún lugar del mundo instalar sistemas en promedio a más de 2500 msnm e incluso se ha logrado experimentar con sistemas de altiplano a una altura de 4000 msnm con excelentes resultados, siendo la perseverancia y la innovación tecnológica de los responsables del proyecto que han logrado adecuar y adaptar estos sistemas en el territorio Boliviano, donde su geografía es bastante cambiante y variable con pisos agroecológicos de diversa forma.



**Ilustración 2.7. Descomposición de la biomasa en sus diferentes componentes. Fuente: Informe complementario sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogás en Extremadura.**

## 2.5.2. La producción de biogás

Con el término biomasa se hace referencia a cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico natural y que pueden ser aprovechados para la producción de energía.

La digestión anaeróbica es un proceso microbiológico que, en condiciones anaerobias (ausencia de oxígeno) permite transformar la materia orgánica en metano que es el componente mayoritario del biogás, y el que le da sus propiedades como combustible. Además de metano, el biogás también contiene dióxido de carbono (30-50%) y trazas de otros gases como ácido sulfhídrico  $H_2S$ , que es corrosivo, o nitrógeno. Existen diversos factores que afectan a este proceso y limitan la producción de biogás, y que conviene, por tanto, tener en cuenta.

- **Temperatura.** La digestión anaeróbica se puede llevar a cabo en un amplio intervalo de temperaturas, pero dependiendo del tipo de bacterias que se utilicen se pueden diferenciar tres intervalos diferentes. En general, el intervalo mesofílico es el más utilizado, pese a que en el termofílico es donde se tiene la mayor producción de biogás. Esto es debido a la mayor sensibilidad que presentan las bacterias termofílicas a las pequeñas variaciones térmicas, lo que conlleva a un mayor control del sistema y, por tanto, a una actividad más costosa.

Bacterias	Rango de temperaturas (°C)	Sensibilidad (°C/hora)
Psicrofílicas	menos de 20	$\pm 2$
Mesofílicas	entre 20 y 40	$\pm 1$
Termofílicas	más de 40	$\pm 0,5$

**Tabla 2.3. Intervalos de temperaturas en el que trabajan las bacterias anaeróbicas. Fuente: Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento (GTZ GmbH, 1999)**

- **Nutrientes.** Para el desarrollo del proceso se necesita, además de una fuente de carbono y energía, la presencia de una serie de nutrientes minerales (nitrógeno, azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, etc.). En el medio a digerir debe haber una relación adecuada entre nutrientes para el desarrollo de la flora bacteriana. Dependiendo de la materia prima con la que se alimente el biodigestor, la proporción entre los diferentes nutrientes variará y para una clase dada de bacterias, a una temperatura dada y un tiempo de permanencia fijo, obtendremos una cantidad diferente de biogás. Así por ejemplo y de forma aproximada por cada kilo de estiércol fresco de cerdo obtendremos 51 litros de biogás al día mientras que solo 35,3 si el estiércol es de vaca.
- **Acidez del medio, pH.** Es uno de los parámetros de control más habituales debido a que en cada fase del proceso los microorganismos presentan máxima actividad en un intervalo de pH diferente. Sin embargo se puede tomar un valor genérico de entre 7 y 7,5.
- **Tiempo de residencia.** En los digestores continuos y semicontinuos, como funcionan en condiciones estacionarias, la variable tiempo definida en el reactor discontinuo se reemplaza por el tiempo de retención, que se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria. El tiempo de retención indica, por tanto, el tiempo que el substrato permanece por término medio en el digestor. Este parámetro está íntimamente ligado con el tipo de substrato y la temperatura del mismo. La selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y, consecuentemente, serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material.

Región característica	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días)
Trópico	30	25
Valle	20	37
Altiplano	10	75

**Tabla 2.4. Tiempo de retención según temperatura. Fuente: Guía de biodigestores familiares, Jaime Martí**

- Presencia de inhibidores. Existen una gran cantidad de sustancias que pueden inhibir la digestión anaeróbica. Entre ellos, cabe destacar el oxígeno, amoníaco, metales pesados, antibióticos y detergentes y ácidos volátiles.

En la construcción de biodigestores de bajo costo se pretende favorecer aquellos factores que maximicen la producción de biogás (Temperatura, nutrientes, etc.), pero siempre buscando un compromiso con la cantidad de materia prima disponible y la inversión económica necesaria.

### 2.5.3. Utilidades del biogás

---

La producción de biogás mediante biodigestores de bajo costo es una tecnología polivalente que puede adaptarse diferentes situaciones y necesidades.

Probablemente el uso más extendido para el biogás sea la cocción de alimentos en sustitución de los combustibles más tradicionales como la bosta seca o la madera. Para ello puede o bien adaptarse una cocina metálica típica de garrafa de butano, o bien construir una completamente nueva a partir de materiales rudimentarios y baratos. Estas cocinas de biogás llevan estudiándose e instalándose desde hace años de forma casi paralela a los biodigestores familiares.

El biogás también puede utilizarse para la generación de electricidad. Existen nuevos motores generadores en el mercado de pequeñas dimensiones, incluso de medio kilovatio. Estos nuevos generadores, cuyo coste ronda los 300 dólares, pueden proveer de electricidad a una familia para usos domésticos. El consumo de esos motores, de ser alimentados con biogás, sería entorno a los 300 litros por hora. Como se ha comentado, Esta puede ser una alternativa a las instalaciones familiares fotovoltaicas, de menor coste (sumando biodigestor y generador) y de mayor alcance al añadir gas para cocinar y fertilizante para los cultivos.

Otras de las utilidades del biogás son la producción de luz de forma directa, o la calefacción. En el primero de los casos puede quemarse el biogás calentando una camisa cerámica similar a la utilizada en los Camping-gas generando luz. Y en la segunda modificando una estufa corriente de gas para funcionar con biogás.

Por último, también puede ser utilizado para la producción de agua caliente. Antiguamente existían las duchas de alcohol y se puede adaptar el diseño para que sea con biogás. El principio es muy sencillo: una llama directa sobre un serpentín de la tubería de agua.

La finalidad de este trabajo es desarrollar y calcular un sistema que sirva para solventar de forma satisfactoria esta última utilidad. Es decir, diseñar un calentador de agua que se adapte a las necesidades energéticas y económicas que hoy día prevalecen en la mayor parte del área rural de Bolivia.

### 3. Marco teórico

---

Los sistemas de producción de ACS no son nada nuevo. Se trata de sistemas ampliamente estudiados y en la actualidad existe una gran variedad en cuanto a capacidad, fuente energética y forma de calentar el agua.

Por ello para el diseño de un calentador con los requerimientos energéticos y económicos propuestos, basta con echar un vistazo a las diferentes opciones que existen en el mercado, seleccionar entre ellas la más adecuada, en este caso, el calentador instantáneo de gas doméstico, y analizar su funcionamiento.

Una vez comprendido el sistema, se reducen sus elementos al mínimo (ajustamos criterios económicos), y se estudia cada uno por separado. Por último se selecciona la geometría más simple y barata de cada elemento, sentando así la base para su modelado en el capítulo siguiente



## 3.1. Producción de ACS y calentadores de agua.

El calentamiento de una masa de agua en la naturaleza se lleva a cabo principalmente a través de dos procesos: por absorción de radiación solar, o bien por contacto con zonas de la corteza terrestre en las cuales la temperatura es más elevada por la cercanía del magma (agua termal). Ambas fuentes de agua caliente son difícilmente aprovechables por el ser humano, en el primero de los casos porque la baja intensidad de la radiación es insuficiente para elevarla unos pocos grados, y en la segunda porque las fuentes de agua termal son cuanto menos, escasas. La única forma viable que tiene el ser humano de obtener agua caliente es su calentamiento de forma artificial.

El calentamiento del agua es un proceso termodinámico, actualmente de gran utilidad tanto a nivel doméstico como industrial, que consiste en calentar un volumen de agua elevando su temperatura de entrada consumiendo una cierta cantidad de energía. Los usos más habituales a nivel doméstico del agua caliente son la limpieza, la cocina, el aseo y la calefacción. A nivel industrial las utilidades son mucho más diversas.

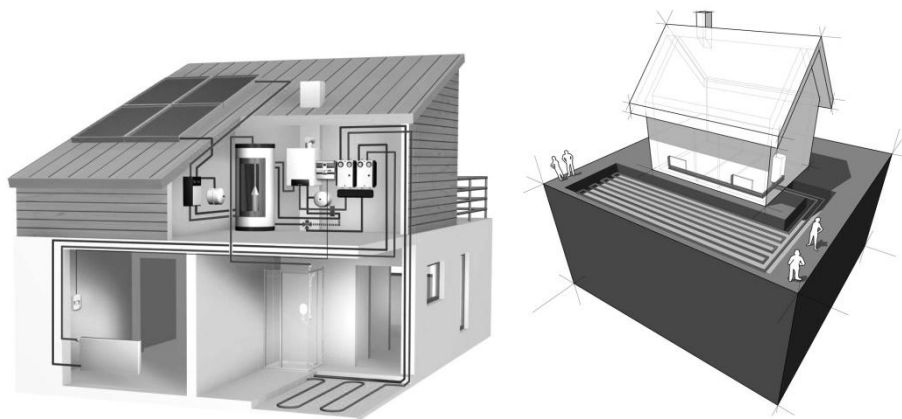
Se conoce más concretamente como producción de agua caliente sanitaria o ACS como el calentamiento del agua apta para el consumo humano, es decir del agua potable. La principal diferencia con el calentamiento del agua corriente utilizado generalmente en procesos industriales, es que el agua debe circular siempre por un circuito cerrado (en el caso de calentadores de combustión sin entrar en contacto con los gases), e inerte, de forma que se no introduzca en el agua sustancias que pudieran ser nocivas para el ser humano.

El dispositivo encargado de realizar esta función recibe diversos nombres dependiendo de su tipo, capacidad, o área geográfica: calentador, calefón, caldera. Sin embargo en lo que sigue nos referiremos a éste como calentador por su referencia más genérica. Así podríamos definir un calentador como el sistema encargado de transformar una cierta cantidad de energía (en ciertos calentadores esta transformación no es necesaria) en energía térmica y transmitírsela al agua de la forma más eficiente posible. Atendiendo a esta definición podremos llevar a cabo una clasificación según su capacidad energética, su función, su fuente de energía o su forma de transmisión del calor al agua:

- Según su capacidad:
  - Individuales. Son aquellos que tienen capacidad para alimentar a uno o un grupo muy limitado de aparatos. Son los calentadores domésticos de los que se dispone normalmente en casa, y su potencia suele oscilar entre 1,5 kW, para calentadores eléctricos acoplados a la alcachofa de la ducha, y 30kW para calentadores grandes de gas.
  - Centralizadas. Se utilizan normalmente en bloques de vivienda de calefacción central. Un único dispositivo es capaz de proveer de agua a una gran cantidad de dispositivos. Su potencia es mucho mayor que las de los calentadores individuales.
- Según su función:
  - Exclusivos. Su uso está destinado exclusivamente a la producción de ACS, es decir, básicamente, del agua que sale de los grifos y duchas de una vivienda
  - Mixtos. En este caso el calentador sirve para proveer tanto de ACS como calefacción. Normalmente los calentadores centralizados suelen ser mixtos.
- Según su fuente de energía:
  - Combustión. La potencia calorífica se genera mediante la quema de una cierta cantidad de combustible que puede ser sólido líquido o gaseoso. El calentador de combustión más utilizado en la actualidad utiliza gas (natural o GLP) debido principalmente a una mayor facilidad de transporte (abaratando costes) y una menor producción de productos indeseables en la combustión. El funcionamiento es común en todos ellos, los gases calientes procedentes de la combustión se hacen pasar a través de un serpentín por el que circula el agua transfiriéndole potencia calorífica. Su eficiencia suele rondar el 70 o 80%.
  - Eléctrica. La potencia se extrae de la red eléctrica. La electricidad al circular por unas resistencias las calienta y este calor se cede al agua por contacto directo o indirecto. En el contacto directo el agua de utilización entra en contacto con las resistencias,

mientras que en el indirecto existe un fluido que hace de intermediario. Tienen un rendimiento superior a los de gas, un 99%, son más pequeños y no requieren ventilación, sin embargo sólo son prácticos en países de clima templado o caliente dada su baja capacidad de calentamiento a grandes flujos de agua, o si la temperatura inicial del agua es muy baja. Además el precio de la energía es más alto que en el caso del gas, a igualdad de calor producido.

- **Solar.** Los calentadores solares aprovechan la radiación solar para calentar el agua. Todos ellos disponen de un colector solar cuya función es la de captar la mayor cantidad posible de radiación abarcando una gran superficie. El calor absorbido se transmite directamente al agua. En la actualidad se utilizan para disminuir el consumo energético de las viviendas, pero rara vez tienen suficiente capacidad para sustituir a los de combustión o los eléctricos. Tienen la ventaja de que el “combustible” es gratis, sin embargo su costo inicial es elevado y su funcionamiento depende de las condiciones climáticas.
- **Geotérmica.** En este caso la energía requerida para calentar el agua procede del subsuelo. Se trata más de un sistema de climatización que de producción de ACS, a menos que la temperatura del subsuelo sea lo suficientemente alta, lo cual está limitado a determinados puntos del planeta asociados a actividad volcánica. La climatización geotérmica utiliza la alta inercia térmica del subsuelo, que mantiene una temperatura constante durante todo el año, para convertirlo en sumidero de frío o calor.

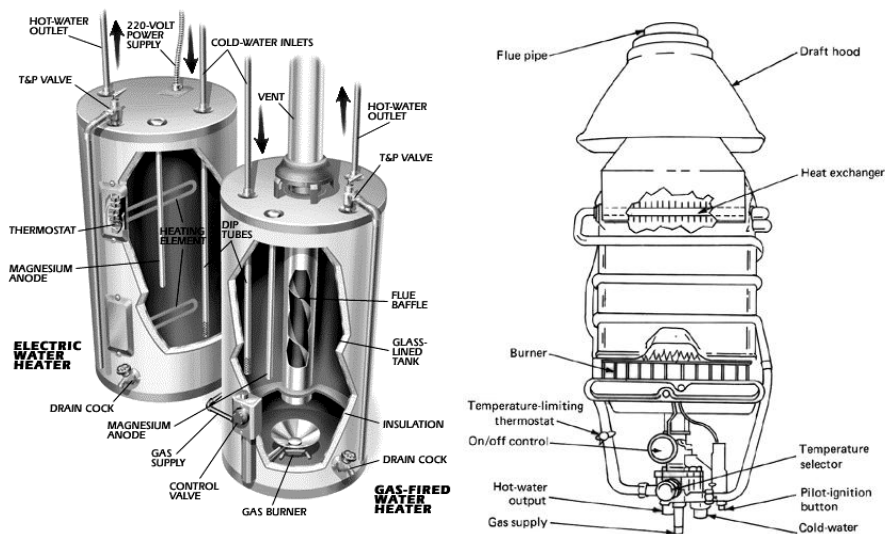


**Ilustración 3.1. Sistema de Producción de ACS por colector solar (izqda.) y sistema de climatización geotérmica (dcha.)**

- Según su forma de transmisión de calor:
  - **Instantáneos o de paso.** En los calentadores instantáneos el agua fluye de forma continua por un serpentín que es calentado por una de las fuentes energías antes nombradas. Son unidades que están normalmente apagadas, sin consumir energía, un sensor de flujo se activa cuando detectan circulación de agua e inician su procedimiento de calentamiento. Los modelos más avanzados están equipados con controles electrónicos de temperatura y caudalímetros. De esta manera el usuario puede seleccionar la temperatura que desea en grados. El controlador electrónico mide el flujo de agua que está circulando, la temperatura de entrada, y gradúa la potencia que aplicarán las resistencias de calentamiento en el caso de los modelos eléctricos o el tamaño de la llama en los modelos a gas.
  - **Acumulativos o de tanque.** Los calentadores de acumulación poseen un tanque donde acumulan el agua y la calientan hasta alcanzar una temperatura seleccionada en su termostato. La capacidad de su depósito es muy variable y va desde los 15 hasta los 1000 litros. Utilizan como energía gas natural, GLP, electricidad, carbón, luz solar, madera o keroseno. Estos calentadores tienen la ventaja de suministrar agua caliente a temperatura constante por tantos litros como casi la totalidad de depósito. Además admite que se abran varios grifos a la vez sin que se vea afectada la temperatura del agua que surte lo que no ocurre en los calentadores instantáneos. Su desventaja está



en el tamaño de su depósito si está mal elegido, pues si se agotase el agua caliente acumulada puede pasar un rato largo antes de que se recupere la temperatura, lo cual depende también de la energía utilizada.



**Ilustración 3.2. Calentador acumulativo eléctrico y de combustión (izqda.) y calentador instantáneo de combustión (dcha.)**

## 3.2. Elección del calentador

A la hora de diseñar un calentador con biogás para el área rural boliviana había que tener en cuenta el cumplimiento de los objetivos citados anteriormente en el punto 1.5, así como las diversas limitaciones a las que iba a estar sometido:

- **El coste económico.** El punto 2 trata brevemente el tema de la pobreza y bajo poder adquisitivo de las familias que viven en el área rural de Bolivia. Es por ello que el coste para construir uno de estos calentadores se convierta en una limitación primordial. Esto se traduce, a un nivel más técnico, en una limitación tanto en los materiales a utilizar, como en la mano de obra cualificada necesaria para la elaboración de sus respectivas partes.
- **La simplicidad.** La simplicidad en el diseño implica un mínimo número de elementos así como una mejor comprensión por parte de sus usuarios. Por un lado se optaría por un número muy limitado de elementos simples y que, a poder ser, se encuentren prefabricados en las tiendas (abaratamos costes y facilitamos su sustitución en caso de avería). Y por otro, una mayor comprensión del sistema facilitará su montaje y arreglo sin necesidad de acudir a profesionales.
- **La durabilidad.** El calentador se expone a fenómenos internos y externos que si se producen de forma prolongada y no se minimiza su efecto en el diseño pueden llevar a una reducción de su vida útil. Por ello se tendrá en cuenta la exposición a altas temperaturas en el interior, así como a los fenómenos meteorológicos en el exterior.
- **La potencia disponible.** Hay que prever de antemano la capacidad energética disponible en una comunidad aislada. En este caso se dispondrá de una cierta cantidad de biogás diario, una irradiación solar más bien alta, así como un completo aislamiento eléctrico.

De acuerdo con estas premisas y atendiendo a la clasificación anterior se pudo limitar el campo de acción de la siguiente manera:

- Se descartaron los calentadores centralizados debido a que la potencia disponible en una comunidad era insuficiente para dar cobertura a más de un aparato simultáneamente tal y como se ha calculado en el capítulo anterior.
- Por la misma razón que en la anterior, el calentador se limitará a la producción de ACS y no de calefacción.

- En resumen, el calentador de partida debería ser un calentador individual de paso que utilizase los gases de combustión del biogás (y en el mejor de los casos la energía solar como soporte) para producir una pequeña cantidad de ACS. El proceso de diseño a partir de aquí se vuelve más simple, ya que consistió básicamente en analizar los elementos de un calentador de este tipo común simplificando los componentes al máximo y reduciendo su número a lo estrictamente necesario.

### 3.3. Calentadores instantáneos de gas

Este tipo de calentadores se materializan como un sistema protegido por una carcasa en el que se alojan el hogar o cámara de combustión, el quemador y el intercambiador de calor. El combustible se quema en el hogar y el quemador tiene como finalidad transformar la energía potencial contenida en el combustible en energía térmica que pueda ser transferida al agua que circula por el intercambiador. Como la llama producida por un determinado quemador tiene una longitud y una anchura determinada se comprende que la forma y dimensiones de la cámara de combustión están relacionadas con el quemador. El intercambiador de calor recibe de la llama el calor por radiación y por convección el calor de los gases producto de la combustión (GPC).

El paso del calor de la combustión al fluido se realiza a través de las superficies del intercambiador y necesita, tanto de la fuerza impulsora representada por la diferencia de temperaturas entre la llama o los gases producto de la combustión y dicho medio auxiliar, como de la masa de gases calientes.

Se requieren unas ciertas dimensiones en el hogar para que puedan alojarse convenientemente la llama y los gases de combustión, mientras que el cambiador precisa de una cierta superficie para que a su través pueda transferirse el calor de los productos de la combustión. Ambas cosas dan como resultado las dimensiones del calentador como aparato.

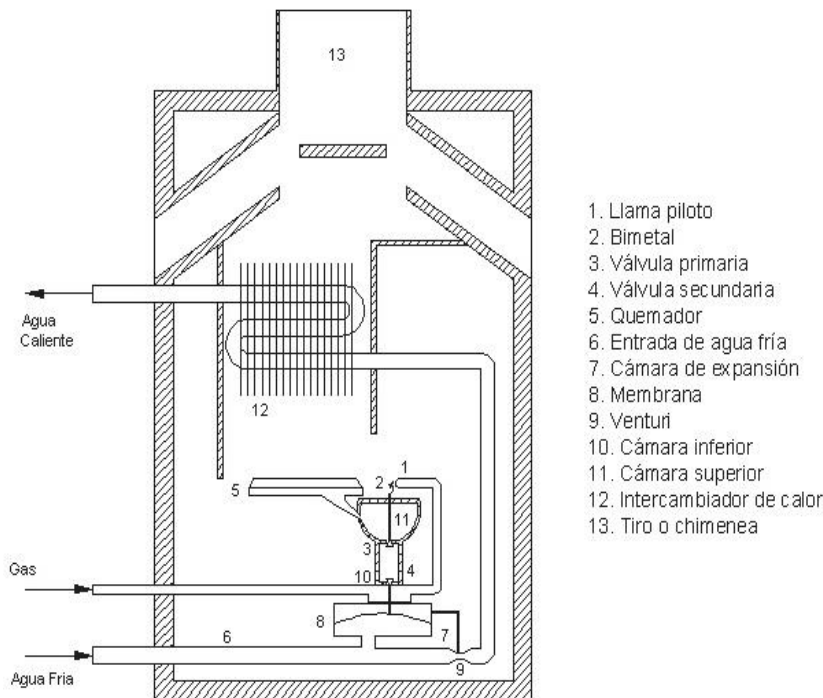
Tal y como se verá más adelante la calidad de la combustión depende exclusivamente del quemador y viene reflejada por la temperatura de la llama, el exceso de aire de combustión, el contenido de dióxido de carbono en los productos de combustión y la ausencia de inquemados. De la tecnología del cambiador depende la eficacia con la que el calor producido en la combustión se transfiere al fluido.

De estas consideraciones podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Interesa la temperatura más alta posible en el hogar que resulte compatible con los materiales empleados en la construcción de la cámara de combustión y el intercambiador.
- El quemador debe obtener del combustible la mayor parte de su energía potencial y debe hacerlo de la manera más higiénicamente posible. El que la combustión sea higiénica significa que los productos de la combustión van ser compatibles con las exigencias relativas a la salud de las personas y a la conservación del medio ambiente.

El funcionamiento de los calentadores de paso modernos es bastante sencillo (Ilustración 3.3). En primer lugar debe encenderse una llama piloto (1), que es la que encenderá luego el gas del quemador (5). La llama piloto dilata el bimetálico (2) y abre la válvula (3), que es la primera barrera al paso del gas al quemador.

Cuando se abre un grifo de agua caliente, circula por (6) ejerciendo una presión en la cámara (7) por el lado inferior de la membrana (8). Se puede observar que la tubería de agua lleva incorporada normalmente un Venturi<sup>16</sup> que tiene conectada una toma de presión en la parte del estrechamiento con la parte superior de la cámara (10). En el estrechamiento la presión es menor, con lo que la membrana (8) empuja el vástago de la válvula (4) hacia arriba y deja paso libre al gas, que con las dos válvulas abiertas puede llegar al quemador y encenderse con la llama piloto.



**Ilustración 3.3. Esquema de calentador instantáneo doméstico de gas. Fuente: Elaboración propia**

El gas tiene que atravesar dos cámaras, la inferior (10), y la superior (11), para llegar al quemador, y dos obstáculos, la válvula (3), que sólo estará abierta si está encendida la llama piloto, y la (4), que solo estará abierta si se abre un grifo de agua caliente.

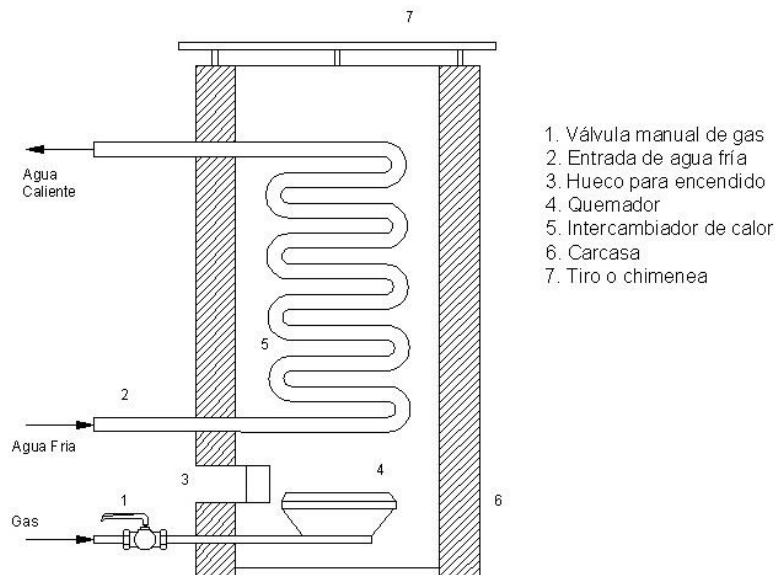
En el hogar se produce la combustión del gas, y el calor se transfiere al agua de los productos de la combustión a través del serpentín (12), cuya función es la de aumentar la superficie de intercambio. En el momento en el que se cierra el grifo de agua caliente las presiones en (7) y (10) se igualan, con lo que el vástago de la válvula (4) desciende cerrando el paso al gas.

Así pues, podemos comprobar como la mayor parte de los elementos de un calentador están destinados al encendido automático de éste. Atendiendo al precepto de simplicidad desde el que se partía en el diseño del calentador se quiso renunciar a cualquier tipo de funcionamiento automático ya que encarecía el producto final y lo complicaba de sobremanera. (Ilustración 3.4) Con ello, se sustituye el circuito de apertura del gas por una única válvula manual (1) y el sistema de encendido por uno mucho más rudimentario, en el que el usuario utilizara un dispositivo cualquiera (vela, mechero, cerilla, etc.) para prender el quemador, tal y como se hace en las cocinillas de gas. Había que tener en cuenta por tanto una apertura (3) en la carcasa del nuevo diseño para acceder al quemador y provocar el encendido de forma segura.

El resto de elementos del nuevo diseño, quemador (4), intercambiador (5) y carcasa (6), necesitaron ser calculados individualmente buscando un rendimiento elevado al mismo tiempo que se simplificaba su forma y reduciendo el número de piezas. En el punto 4 se crea el modelo para su cálculo, y en el punto 5 se analizan estos elementos experimentalmente.

A continuación se recopila la información necesaria para la comprensión de cada una de estas partes fundamentales y facilitar el entendimiento del modelo que se describe en el capítulo siguiente.

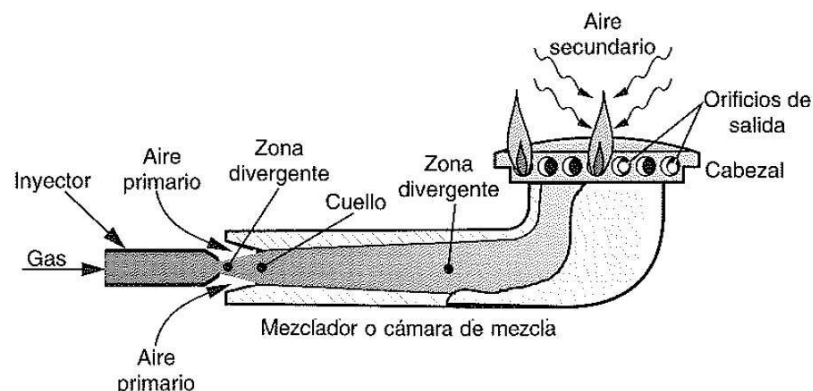
<sup>16</sup> Efecto Venturi: fenómeno de fluidos descrito en el ANEXO B



**Ilustración 3.4. Esquema de calentador instantáneo de gas simplificado. Fuente: Elaboración propia**

#### 3.3.1. El quemador

La combustión<sup>17</sup> de un gas requiere que éste se mezcle con el comburente (aire); dicha mezcla puede efectuarse antes o en el mismo momento de la combustión, y no puede hacerse de forma arbitraria o aleatoria, ya que las propiedades de la combustión dependen de cómo se hace esta mezcla aire combustible.



**Ilustración 3.5. Esquema y partes de un quemador atmosférico. Fuente: Biblioteca del Instalador de Gas. A.L. Miranda, R. Oliver**

Pues bien, el quemador es el dispositivo que regula la mezcla aire-combustible, permitiendo la combustión controlada del gas, de ahí que su estudio sea fundamental para el diseño del calentador.

El quemador es por tanto el dispositivo que mezcla de forma regulada el aire y el gas, permitiendo una correcta combustión. El encendido de la mezcla puede ser provocado externamente como en el caso de nuestro calentador, o bien puede llevar incorporado un sistema automático de encendido como en los calentadores modernos. El quemador debe garantizar que se cumplan los siguientes requisitos:

- La mezcla del gas y el aire debe ser homogénea y adecuada en función del tipo de llama que se desee.
- La llama debe de ser estable

<sup>17</sup> Análisis de la combustión y propiedades de la llama en ANEXO B

- La cantidad de gas que llegue al punto de mezcla debe ser la correspondiente a la potencia requerida.
- En general, se pretende que la combustión sea completa

La clasificación de los quemadores puede realizarse atendiendo a diversos criterios: por la forma de entrada de aire, por el color de su llama o por su aplicación. A continuación aparece una tabla con sus características.

Criterio	Clasificación	Características
Entrada aire	Quemador atmosférico	El aire entra de forma natural, mediante el efecto Venturi
	Quemador mecánico	El aire entra impulsado mediante un ventilador
Llama	De llama azul/premezcla	El aire se aporta en dos etapas: el aire primario previo a la combustión y el secundario
	De llama blanca	Únicamente se aporta el aire secundario
Aplicación	Catalítico	La combustión se lleva a cabo en el seno de una lana ignífuga, impregnada con una sustancia que favorece la combustión
	Infrarrojos	La combustión se lleva a cabo próxima a una pantalla cerámica que emite calor por radiación
	Soplete	Se produce una llama de alta temperatura: se utiliza en soldadura
	Mechero Bunsen	Es un quemador de llama azul, muy sencillo utilizado principalmente en laboratorios

**Tabla 3.1. Clasificación y características de los quemadores de gas. Fuente: Biblioteca del Instalador de Gas. A.L. Miranda, R. Oliver**

El quemador de llama blanca puede estar constituido simplemente por un tubo por el que sale el gas directamente a través de uno o más orificios. No se lleva a cabo la mezcla previa de aire y gas. Al producirse la combustión, la llama toma el aire de la atmósfera que le rodea.

Cabe por tanto pensar, que si el aire que rodea la llama está enrarecido y no contiene la suficiente cantidad de oxígeno la combustión será incompleta ya que no existirá oxígeno suficiente para reaccionar con el gas que sale por el orificio, dando lugar a la producción de monóxido de carbono (tóxico para el ser humano) e inquemados. Dado que la combustión en el calentador se iba a producir en el interior de la carcasa, en la que la aireación sería escasa o nula, se desecharon este tipo de quemadores con el fin de evitar la posible aparición de gases tóxicos.

El quemador de llama azul o de premezcla es el que utiliza el gas previamente mezclado con aire antes de la combustión. El aire aportado directamente, bien sea por aspiración natural (atmosférico) o por medios mecánicos, se denomina aire primario. El aire que se aporta a través de la llama se denomina aire secundario. La cantidad de aire primario acostumbra a ser, por lo general, el 60% del aire total aportado en la combustión.

Cuando el quemador está bien ajustado, la llama es estable y azulada. Y una característica importante de la llama azul es que la combustión tiende a ser con exceso de aire y, por tanto, completa, con lo que se elimina la producción de monóxido de carbono.

Por otro lado la utilización de un sistema de premezcla evitaba hasta cierto punto la utilización de un ventilador, el cual requiere una fuente de energía externa, de la que, como se ha explicado en el apartado 3.2, no se disponía. Quedó, por tanto, excluida también la idea de un quemador mecánico, lo que llevó finalmente a diseñar y calcular un quemador atmosférico de premezcla.

En los quemadores atmosféricos el aire primario es aspirado por efecto Venturi, el cual se explica en el ANEXO B.2. Este aire es aspirado del medio ambiente que rodea el calentador, a diferencia del secundario, que procede de los alrededores del quemador y contendrá menor cantidad de oxígeno. Este hecho hubo que tenerlo en cuenta ya que la calidad del aire podía afectar a la combustión.

Este tipo de quemadores está constituido en su forma más simple por un inyector, la cámara de mezcla y el cabezal:

- inyector

Es el elemento encargado de provocar la depresión en el gas para favorecer la entrada de aire primario al circuito. Se trata de una tobera, con un orificio a la salida, que fija el caudal de gas según la presión. El diámetro de la sección de salida es mucho menor que el de entrada. Esto provocará un aumento de la velocidad, y una consecuente disminución en la presión.

El diámetro de salida del inyector no debe ser modificado, ya que si esto ocurriera para una misma presión de entrada, se modificaría tanto la cantidad de gas como la proporción de aire, alterando las propiedades de la combustión en el quemador.

- Mezclador o cámara de mezcla

Es el elemento destinado a mezclar el gas con el aire, el cual entra por el mismo sitio que el inyector, o bien, a través de agujeros practicados en las paredes. El espacio por el que entra el aire primario se denomina lumbrera. En general, la lumbrera permite una regulación mediante diversos mecanismos.

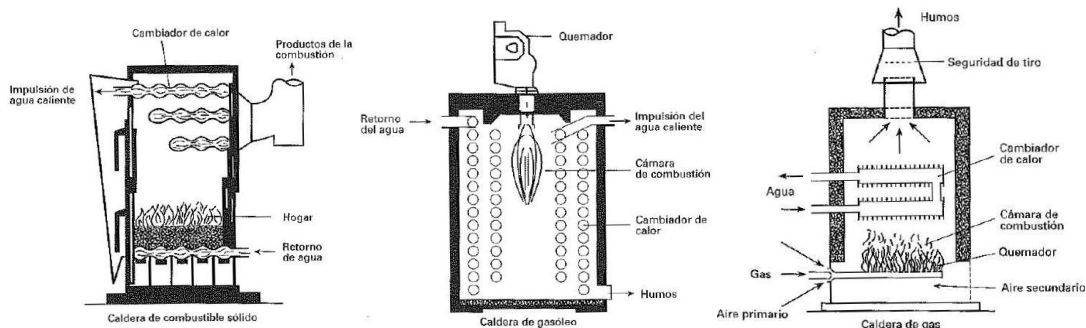
- Cabezal

El cabezal contiene los orificios calibrados por donde sale la mezcla aire-gas. Se trata una pieza clave del quemador ya que, por un lado debe tener la forma adecuada para que la combustión se produzca dirigida a aquellas partes que se desea calentar, por otro permita una correcta aireación de la llama (aire secundario), y además, tenga el área de salida justo para que se produzca un equilibrio entre la velocidad de salida del gas y la velocidad de la reacción de combustión evitando así los fenómenos de avance o retroceso de llama que se explican en el ANEXO B.3

### 3.3.2. El intercambiador

El paso del calor de la llama y de los gases producidos en la combustión al fluido calorportador se realizan en el intercambiador de calor. Un intercambiador de calor se define de forma genérica como aquel dispositivo utilizado para transferir energía térmica entre dos o más fluidos, entre una superficie sólida y un fluido o entre partículas sólidas y un fluido, las cuales se encuentran a diferente temperatura y en contacto térmico. En el caso concreto que nos interesa, la mayor parte de la transmisión se lleva a cabo entre dos fluidos, los cuales permanecen separados por una pared sólida e impermeable: el calor generado en la reacción de combustión provoca el aumento de la temperatura de los gases resultantes (GPC), que atraviesan el intercambiador (muro divisorio), calentando al el agua que circula por su interior (segundo fluido, o fluido calorportador).

En éste aspecto, el intercambiador puede tener partes expuestas sólo a la llama, a la llama y a los gases simultáneamente o sólo a los gases. Conforme el calor va pasando de los gases al fluido calorportador, éste se calienta, mientras que los GPC se enfrían<sup>18</sup>. Se comprende que los gases sean expulsados del aparato lo más fríos posible porque así se habrá aprovechado bien su energía, si bien, es necesario encontrar un equilibrio entre la temperatura de salida de los GPC (menor con el aumento de área de intercambio) y el costo del intercambiador.



**Ilustración 3.6. Materialización de las calderas de combustible sólido, líquido y gaseoso. Fuente: DOCUMENTOS TÉCNICOS DE INSTALACIONES EN LA EDIFICACIÓN DTIE, Pedro Pozo**

<sup>18</sup> Teoría de intercambiadores de calor en ANEXO B



La transmisión de calor de la llama y los gases al fluido calorportador se realiza por radiación, conducción y convección<sup>19</sup>.

En la combustión de carbón gran parte del calor pasa del combustible incandescente al intercambiador por radiación; en la combustión de gasóleo buena parte del calor se transfiere por radiación y el resto por convección. En la combustión de gases, con la excepción de los quemadores a radiación, sólo una pequeña parte del calor se transfiere por radiación, y la mayor parte lo hace por convección.

Así, en este aspecto, cada combustible tiene su particularidad por lo que es adecuado para la caldera concreta diseñada, perdiéndose rendimiento, en la mayor parte de los casos, cuando se quema en otra caldera.

La superficie de radiación de una caldera es aquella que la llama o los GPC incandescentes ven. El calor transferido por radiación está relacionado con las temperaturas absolutas elevadas a la cuarta potencia<sup>20</sup> y es por esto por lo que los materiales de las superficies expuestas a la radiación tienen que aguantar las más altas temperaturas y además estar lo más limpias posibles para lograr que se refrigieren mientras transmiten el calor al fluido calorportador.

El material con que se ha construido el hogar o cámara de combustión, expuesto directamente al fuego y a los GPC calientes, es un elemento de desgaste y el cambiador de calor puede corroerse, deformarse y agrietarse. En las revisiones periódicas de mantenimiento deberán tenerse en cuenta estos aspectos. El peligro es tanto mayor cuanto el material del cambiador no pueda refrigerarse por una circulación escasa o desigual del fluido calorportador.

Lo que caracteriza la transferencia de calor por convección desde los GPC calientes a la pared metálica del cambiador es que las moléculas de los GPC, en contacto con la pared, se desplazan con relación a la pared, cediendo su sitio, a la vez que ceden su calor a otra nueva molécula. La fuerza que impulsa el paso del calor por convección es la diferencia de temperaturas entre los GPC y la superficie metálica.

Si el movimiento de las moléculas de los GPC que están en contacto con la pared es debido a la diferencia de densidad relativa ocasionada por las diferencias de temperatura entre el hogar y el ambiente se dice que es de convección natural. Mientras que si existiera cualquier sistema mecánico (como un ventilador) que empujase los GPC, la convección sería forzada. A igual diferencia de temperaturas entre los GPC y el fluido calor portador, e igual superficie dos cambiadores idénticos pueden transferir distinta cantidad de calor por convección dependiendo del denominado coeficiente de convección.

Valores tipo del coeficiente de convección (W/m <sup>2</sup> °C)	
Gases en convección natural	0,57-28
Gases en convección forzada	11-280

**Tabla 3.2. Valores orientativos de los coeficientes de convección. Fuente: DOCUMENTOS TÉCNICOS DE INSTALACIONES EN LA EDIFICACIÓN DTIE, Pedro Pozo**

El valor de este coeficiente de convección varía ampliamente dentro de cada uno de las calderas pertenecientes a cada grupo y depende de la tecnología con la que el fabricante haya resuelto su construcción. Del examen de los valores contenidos en la tabla 3.2 puede deducirse que las calderas de hogar presurizado precisan, a igualdad de potencia, menos superficie de cambiador que las calderas de convección natural. Por otro lado, la fuerza que impulsa el paso de los gases por el calentador es debida, según los diseños, a la depresión creada por el tiro natural, o a la presión producida por un ventilador. La velocidad con la que los gases fluyen por el intercambiador depende de la diferencia de presiones existente, y la transferencia de calor por convección depende a su vez de la velocidad de paso de los gases.

Una vez que la pared metálica del lado de los GPC del intercambiador ha recibido el calor por convección o radiación, éste se transmite por conducción desde la pared del lado GPC hasta la pared del lado del fluido calorportador.

<sup>19</sup> El análisis de los mecanismos de transmisión de calor involucrados en el problema se da en el ANEXO B

<sup>20</sup> Para el caso de los gases, el calor se transfiere de forma diferente por radiación. Ver ANEXO B.9

La conducción de calor es directamente proporcional a la superficie del intercambiador, a la diferencia de temperaturas existente entre las superficies de metal de ambos lados, y a una constante de proporcionalidad característica de cada material, que se conoce como coeficiente de transmisión de calor por conducción. La transferencia de calor por conducción desde la pared caliente a la pared fría es inversamente proporcional a la distancia que separa ambas secciones (espesor de la pared).

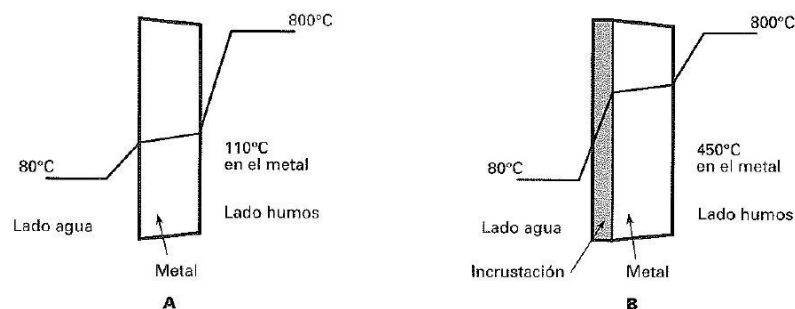
Unos materiales conducen mejor que otros lo que se expresa por la bondad de su coeficiente de conducción y el espesor de pared resulta en sí un inconveniente o resistencia al paso de calor. Su finalidad es la de separar los GPC del fluido calorportador y soportar la presión. Como en las instalaciones individuales la presión es relativamente pequeña, el espesor del metal también lo es y la resistencia que opone el material al paso del calor no tiene, en lo que se refiere a la conducción, excesiva importancia. Mayor importancia tiene sin embargo el ensuciamiento de las paredes del lado del agua y del lado de los GPC, así como la corrosión por deposiciones de sales que toda agua lleva consigo. En la tabla 3.3 se puede observar que el aire se comporta como aislante, lo que justifica la necesidad de purgarlo.

Valores tipo de coeficientes de conducción ( $W/m^2C$ )			
Aceros inoxidables	14-35	Cobre	385
Bronces	26-42	Incrustaciones de sales minerales	0,2
Acero al carbono	37-52	Aire ( $100^{\circ}C$ )	0,031
Fundición	56-64	Aire ( $300^{\circ}C$ )	0,046

**Tabla 3.3. Valores orientativos de los coeficientes de conducción. Fuente: DOCUMENTOS TÉCNICOS DE INSTALACIONES EN LA EDIFICACIÓN DTIE, Pedro Pozo**

Una vez que el calor ha alcanzado la superficie de la pared metálica del lado del fluido calorportador el calor debe transferirse desde esta superficie al fluido, y lo hace de nuevo por convección. Sin embargo el valor del coeficiente de convección de este lado es mucho mayor ya que se trata de un líquido y alcanza valores de entre 170 y 5700 ( $W/m^2C$ ).

En la ilustración 3.7 se puede ver el perfil aproximado de las temperaturas a lo largo de la interfase. La temperatura disminuye bastante entre los GPC y el muro divisorio y relativamente poco entre ambos lados de la pared, y entre la pared interna y el fluido calorportador. Esto se debe a que la resistencia al paso de calor es mucho más elevada entre los GPC y la superficie metálica (coeficientes de convección bajos) que entre ambas superficies o entre la superficie interna y el agua (coeficientes de transmisión de calor más elevados).



**Ilustración 3.7. Perfil de temperaturas para la pared del intercambiador limpia (A) y con incrustaciones de 3mm (B). Fuente: DOCUMENTOS TÉCNICOS DE INSTALACIONES EN LA EDIFICACIÓN DTIE, Pedro Pozo**

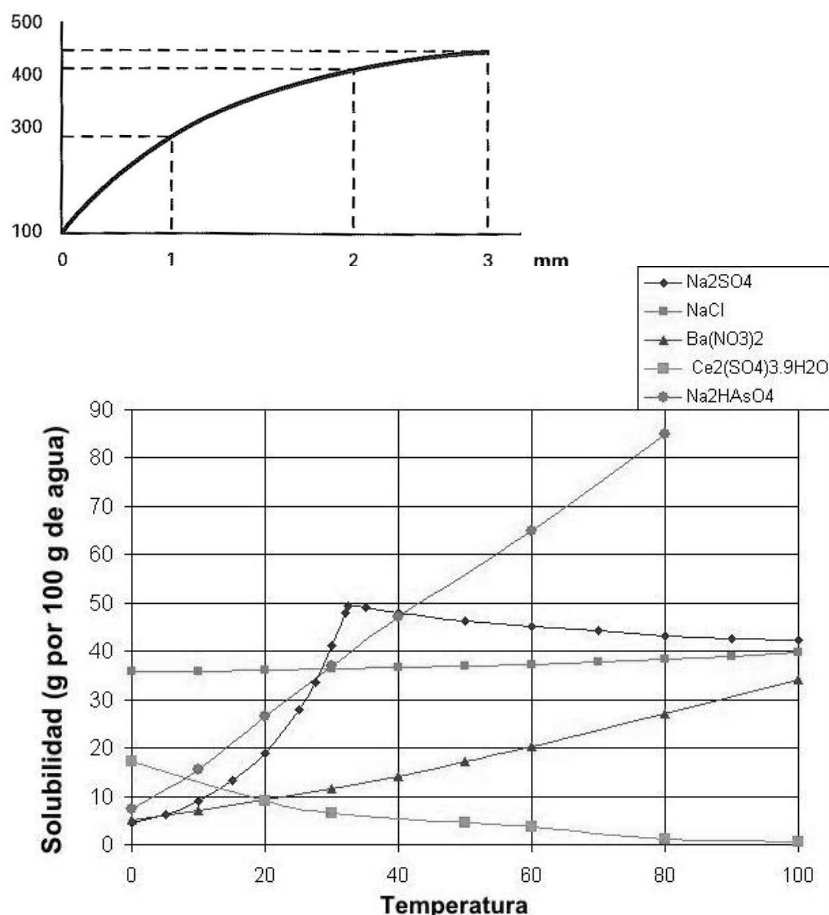
Después de un cierto tiempo de operación se produce el ensuciamiento de las superficies y ya no se transmite tanto calor como cuando el calentador inició su operación. El ensuciamiento es el depósito de óxido, hollín, incrustaciones de sales minerales, sustancias orgánicas, biofilm, etc. y equivale a una resistencia adicional a la transferencia de calor, siendo indispensable una limpieza periódica del intercambiador para retornarlo al estado inicial.

La existencia de incrustaciones de sales minerales en la pared metálica del lado del agua ocasiona la elevación de la temperatura del metal sobre los valores normales, el incremento consecuente de temperatura de los GPC y puesto que los gases abandonan el sistema más calientes, se aprovecha



menos la energía del combustible que cuando las superficies están limpias. Las incrustaciones minerales del lado del agua dependen de la cantidad de sales disueltas en ésta y de la temperatura. Este último factor afecta a la solubilidad de las sales en agua. Dependiendo de la temperatura, el agua admitirá una cierta cantidad de sales disueltas, si esta temperatura aumenta o disminuye puede acarrear la deposición de mayor cantidad de sales (ilustración 3.8, Abajo).

La suciedad en el lado de los GPC es debida a las deposiciones de hollín y de grasas procedentes del ambiente en los aparatos instalados en cocinas que toman el aire de combustión directamente del local.



**Ilustración 3.8.** Temperaturas de la pared metálica del intercambiador en función del espesor de las incrustaciones (arriba) y solubilidad de distintas sales en agua en función de la temperatura (abajo).  
Fuente: DOCUMENTOS TÉCNICOS DE INSTALACIONES EN LA EDIFICACIÓN DTIE, Pedro Poz (arriba), Wikipedia (abajo)

El diseño compacto de la caldera en su conjunto requiere del empleo de tecnologías mejoradas en la transferencia de calor. Así en el lado de los GPC encontramos cambiadores de tubos de aletas, cambiadores de superficies plegadas o acanaladas y cambiadores de fundición con formas geométricas variadas. Las aletas de todo tipo representan un incremento en la superficie de transferencia de calor; las superficies con pliegues buscan, para mejorar el coeficiente de transferencia de calor por convección, el flujo turbulento; los cambios de dirección del flujo, se utilizan para mantener un gradiente de temperatura lo más constante posible de forma que tengamos en todo momento una transferencia de calor constante. Dentro del diseño compacto, los pasos de humos facilitan la ampliación de la superficie de transferencia de calor en el espacio limitado del calentador y favorecen el enfriamiento de los GPC. En el lado del agua, los pliegues de la superficie y la velocidad del agua, favorecen así mismo el flujo turbulento y con ello la transferencia de calor.

Dado que la elevación excesiva en la temperatura del metal lleva a transformaciones metalúrgicas indeseables, una característica necesaria de seguridad de funcionamiento es que no haya fuego en ausencia de flujo de fluido calorportador, ya que actúa como refrigerante. Por ello es necesario que

exista circulación del fluido cuando se inicie la combustión y algún tiempo después de haberse extinguido para alcanzar un enfriamiento que no ocasione tensiones metalúrgicas.

La cantidad de agua contenida en el intercambiador influye sobre el control, siendo más difícil mantener la temperatura que se desea obtener en el fluido calorportador, dentro de la precisión deseada, en sistemas de pequeño volumen. Por otro lado, pequeñas cantidades de caudal llevan a un calentamiento más rápido, lo que es deseable en los sistemas calentadores de ACS, en los que se requiere un leve periodo de tiempo entre la apertura del grifo y la llegada de agua caliente.



*Ilustración 3.9. Intercambiador con aletas (izqda.), superficies plegadas (centro) y intercambiador de fundición (dcha.)*

Los materiales del intercambiador deben resistir, manteniendo su estructura metalúrgica, las temperaturas previstas de operación y la agresividad de los GPC. Con esta última finalidad son habituales los recubrimientos cerámicos o de estaño-plomo.

Teniendo en cuenta los criterios económicos y de simplicidad a la que se estuvo sujeto en el diseño del calentador, se optó para el intercambiador la geometría más sencilla de todas: la utilización de un tubo liso de cobre de fácil adquisición en tiendas, enroscado formando una bobina helicoidal. Para hacer más compacto el intercambiador, se partió para el diseño y cálculo de una geometría que consistía en una serie de bobinados concéntricos abarcando al máximo el área transversal del quemador, y limitando la altura del calentador similar al mostrado en la ilustración 3.10.



*Ilustración 3.10. Geometría seleccionada para el intercambiador del quemador.*

### 3.3.3. La carcasa

La carcasa es el elemento del calentador encargado de resguardar de los agentes externos el resto de componentes, minimizar las pérdidas de calor al entorno y canalizar los humos y productos de la combustión.

La carcasa de un calentador funciona inevitablemente como un intercambiador de calor con el entorno. Por su interior circula un fluido a alta temperatura (los GPC), y por el exterior lo envuelve otro fluido más frío, el aire ambiente. Al existir un gradiente de temperatura, existirá una transferencia de calor desde el interior hacia el exterior, provocando una disminución de la temperatura dentro del calentador. Esta transferencia de calor no deseada, se conoce como pérdidas e influyen negativamente en la eficiencia del calentador. Para evitar que estas pérdidas sean grandes en su diseño habrá que minimizar aquellos factores que favorezcan este intercambio: el coeficiente de conductividad térmica, y la superficie.

Por otro lado, la carcasa se encarga, en los calentadores más simples, de canalizar los GPC, para que su mayor parte atraviese el intercambiador, y posteriormente sean expulsados al exterior de la forma más higiénica posible.

La carcasa además debe cumplir otros requisitos de carácter mecánico, ya que puede ser el encargado de sostener parte de los elementos y resistir altas temperaturas.

Los aislamientos térmicos de buena calidad son costosos, pero se pagan con el ahorro de energía. Hay dos cosas en las que se debe cuidar el aislamiento: la carcasa y las tuberías de agua caliente. Si se trata de un calentador de tanque o caldera el aislamiento evita que se pierda calor con el ambiente. A mayor pérdida de calor mayor será el consumo de combustible. De igual manera las tuberías de agua caliente pierden calor con el ambiente, siendo las tuberías de cobre las que desperdician mayor cantidad de calorías.

En referencia a los calentadores de paso, el aislamiento térmico de la carcasa no resulta tan crucial, pero aislar las tuberías si mejora el ahorro de energía de forma notable.

En el caso de los calentadores de paso otra opción muy empleada es evitar un solo calentador grande para cubrir todos los usos y en cambio colocar varios calentadores de paso cerca de los puntos de uso. Así se elimina el desperdicio de energía en largos tramos de tubería haciendo más eficiente el consumo de agua caliente.

El aislante establece una barrera al paso del calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura, impidiendo que el calor traspase los separadores del sistema que interesa (como una vivienda o una nevera) con el ambiente que lo rodea.

Uno de los mejores aislantes térmicos es el vacío, en el que el calor sólo se transmite por radiación, pero debido a la gran dificultad para obtener y mantener condiciones de vacío se emplea en muy pocas ocasiones. En la práctica se utiliza mayoritariamente aire con baja humedad, que impide el paso del calor por conducción, gracias a su baja conductividad térmica, y por radiación, gracias a un bajo coeficiente de absorción.

El aire transmite calor por convección, lo que reduce su capacidad de aislamiento. Por esta razón se utilizan como aislamiento térmico materiales porosos o fibrosos, capaces de inmovilizar el aire seco y confinarlo en el interior de celdillas más o menos estancas.

Valores tipo de coeficientes de conducción (W/m°C)			
Corcho	0,039	Lana de oveja	0,043
Algodón	0,04	Madera contrachapada	0,12
Cáscara de trigo	0,06	Espuma de poliuretano	0,023
Lino	0,04-0,05	Ladrillo común	0,72
Virutas de madera	0,045	Ladrillo de arcilla refractaria	0,41-1,34
Paja	0,045-0,13	Arcilla	0,79
Hierba	0,04	Cemento	0,72-1,40

**Tabla 3.4. Valores orientativos de los coeficientes de conducción para varios materiales aislantes. Fuente: Elaboración propia**

En definitiva, la carcasa de un calentador debe de minimizar las pérdidas de calor al exterior. Y esto se consigue:

- Aumentando el espesor de la pared.
- Disminuyendo la superficie de exposición (calentador lo más compacto posible),
- Utilizando materiales de baja conductividad térmica (aislantes).

Por otro lado es fundamental que maximice el caudal de GPC que atraviesa el intercambiador canalizándolos correctamente, facilite su extracción. Todo ello, buscando un equilibrio con el coste total.

Al igual que pasa con el intercambiador, al cabo del tiempo, sobre la superficie interna se depositan restos de hollín y grasa, por lo que es conveniente llevar a cabo un mantenimiento, sobre todo, si estos depósitos provocan una obstrucción parcial en el escape de humos.



## 4. Modelado

---

El modelado de los elementos del calentador sirve para obtener ciertos parámetros de funcionamiento, en función de diversas variables que afectan al problema, como son el caudal de biogás o el de agua, su temperatura, la altitud, etc. Estos parámetros servirán para dimensionar los elementos, y en definitiva el calentador para cada caso particular.

En primer lugar se modeliza un quemador atmosférico simple, resolviendo el problema en MATLAB (ANEXO D) para agilizar los cálculos para cada variable. Después se calcula el intercambiador dividiendo el serpentín en elementos finitos y calculando la temperatura del agua y los gases en cada punto, también con MATLAB.

Sin embargo, quedan puntos abiertos en el cálculo, acerca de la forma del cabezal del quemador, o la correspondencia de los resultados del intercambiador con la realidad, para ello se realizan pruebas experimentales que se analizarán en el siguiente capítulo.

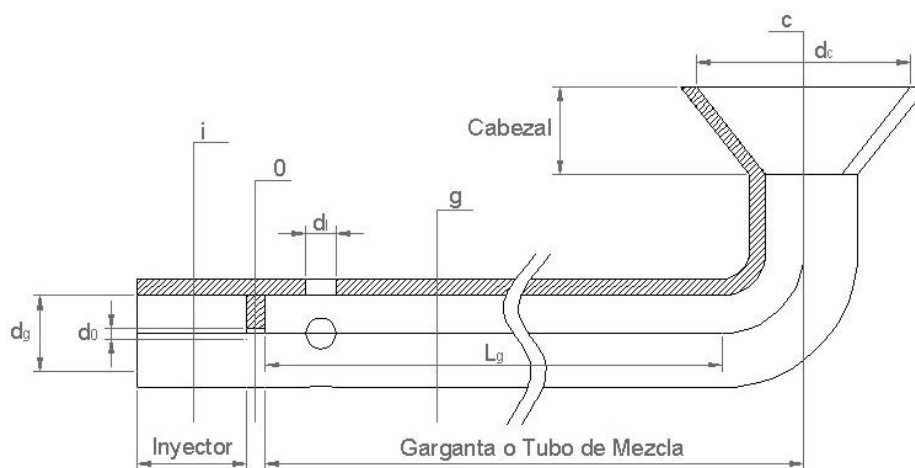


## 4.1. Modelado del quemador

Para el cálculo de un quemador atmosférico adecuado a los requerimientos económicos y energéticos del calentador, se parte de la información relativa a la combustión y diseño de quemadores de gas documentada en los ANEXOS. A partir de ahí se resuelve el problema general en MATLAB, para flexibilizar los cálculos a partir de diferentes parámetros de entrada.

### 4.1.1. Descripción general y geometría

Se estudia el diseño de un quemador de gas lo más simplificado posible. Así pues se pretende calcular las dimensiones necesarias para conformar un quemador como el que se muestra en la ilustración 4.1.



**Ilustración 4.1. Esquema del quemador del calentador. Fuente: Elaboración propia**

El quemador se divide en tres partes diferenciadas como se ha explicado: el inyector, el tubo de mezcla, y el cabezal. Para simplificar su construcción, en vez de conformar dos piezas distintas para el inyector y el tubo de mezcla, se conforma a partir de un único tubo en el que se suelda una placa metálica con el orificio del inyector, y se le perforan los orificios de las lumbreras. Como se observa aparecen diferentes dimensiones que necesitan ser calculadas:

- $d_0$ : Diámetro del orificio del inyector.
- $d_g$ : Diámetro interno de la garganta o tubo de mezcla.
- $L_g$ : Longitud de la garganta o tubo de mezcla.
- $d_l$ : Diámetro de las lumbreras.
- $d_c$ : Diámetro interno de salida de gases del cabezal.

En el problema se utilizan distintos subíndices para referenciar cada zona del quemador: “i”, zona previa al paso de los gases por el orificio del inyector; “0”, para el agujero del inyector y la zona inmediatamente posterior; “g”, para la totalidad del tubo de mezcla, justo después de las lumbreras; “c”, para la salida de gases del quemador a través del cabezal.

### 4.1.2. Caracterización de los fluidos involucrados

En el problema se trabaja con tres fluidos diferentes a la hora de valorar sus propiedades:

- **Biogás**: Formado a su vez por metano  $\text{CH}_4$  y dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  y cuya proporción  $x_{\text{CO}}$  y temperatura  $T_{\text{bio}}$  serán variables de entrada del problema.

$$x_{\text{CO}} = \frac{\% \text{CO}_2}{\% \text{CH}_4} \quad (4.1)$$

Con %  $CO_2$  el porcentaje de  $CO_2$  en el biogás y análogamente para el metano.

- **Aire:** Formado por nitrógeno  $N_2$  (79%) y oxígeno,  $O_2$  (21%). Únicamente podrá modificarse la temperatura  $T_{air}$ .
- **Mezcla aire-biogás:** Caracteriza a la mezcla de gases que circula por la garganta. El aire entra al sistema del exterior a través de las lumbreras por el efecto del inyector. Su composición es un parámetro de entrada, en función de las características requeridas para la combustión  $\overline{AC}$  y de la proporción de aire primario deseado  $R_p$ . Así se define el ratio de entrada  $e$ :

$$e = R_p \cdot \overline{AC}_{teórico} = \frac{[9.52(1 + x_{air})]}{1 + x_{CO}} \quad (4.2)$$

Se mide en volúmenes de entrada de aire primario por volúmenes de biogás a través del inyector.  $R_p$  es la tasa de aireación primaria y  $x_{air}$  el exceso de aire en la combustión. Este ratio de entrada está determinado por la relación de tamaños del orificio del inyector y la garganta.

El cálculo de las propiedades para mezclas de distintos gases se realiza tal y como se explica en el ANEXO B.1. En el cálculo de propiedades también se tiene en cuenta la variación de la densidad de los gases con la presión, la cual varía con la altura sobre el nivel del mar. Por ello se introduce la variable *Altitud*.

### 4.1.3. Problema general

Para la resolución del problema general en MATLAB primeramente se recopilan todos los parámetros de entrada necesarios (tabla 4.1) y luego se van calculando las dimensiones exactas y las reales simultáneamente, basándonos para estas últimas en los materiales y herramientas disponibles. Finalmente se calculan los parámetros de funcionamiento con el quemador real calculado.

Variable	Unidades	Valor por defecto	Explicación
% $CO_2$	-	-	Porcentaje de dióxido de carbono en el biogás utilizado
% $CH_4$	-	-	Porcentaje de metano en el biogás utilizado
$T_{bio}$	°C	-	Temperatura del biogás a la entrada del inyector
$V'_{bio}$	m <sup>3</sup> /s	-	Caudal de biogás utilizado
$T_{air}$	°C	-	Temperatura del aire que rodea al inyector
$\rho_0$	Kg/m <sup>3</sup>	1,29	Densidad de referencia (Gases: Aire a 0°C y 1 atm)
$x_{air}$	-	0	Exceso de aire en la reacción
$C_f$	-	0,9	Coeficiente de flujo en el inyector
$p_{m,i}$	Pa	1000	Presión manométrica previa al paso por el inyector
<i>Altitud</i>	msnm	-	Altitud sobre el nivel del mar
$v_p$	m/s	0,25	Velocidad de propagación de la llama para el biogás
$g$	m/s <sup>2</sup>	9,81	Aceleración de la gravedad

**Tabla 4.1. Variables necesarias para la resolución del problema del quemador. Fuente: Elaboración propia**

El valor definido por defecto de  $x_{air}$  se toma para calcular las dimensiones de forma que introducidos a la combustión la cantidad estequiométrica de aire a través del aporte primario. Es decir, el inyector aporta la cantidad de aire justa para tener una reacción estequiométrica. El coeficiente de flujo del inyector es el correspondiente a un orificio de este tipo<sup>21</sup>. La presión previa al inyector se toman 1000 Pa, que es la presión equivalente a 1m de agua. La velocidad de propagación de la llama para el biogás se toma igual a 25 cm/s.

<sup>21</sup> Orificio con ángulo de penetración de 180° y profundidad mayor que diámetro. Ver tabla B.1.



Las ecuaciones requeridas están documentadas en el ANEXO B. Primero se obtiene el diámetro exacto del orificio del inyector  $d_0$  en mm, para conseguir el caudal de biogás  $V'_{bio}$  deseado, aplicando una presión dada  $p_{m,i}$ :

$$d_0 = \sqrt{\frac{V'_{bio} [3600/1]^4}{0,00364 \cdot C_f}} \sqrt{\frac{\rho_r}{p_{m,i}}} \quad (4.3)$$

Donde  $\rho_r$  es la densidad relativa del biogás que viene dada por:

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (4.4)$$

Los factores entre corchetes son necesarios para el cambio de unidades. El diámetro obtenido es el exacto para esos datos. Sin embargo en su construcción resulta complicado mecanizar orificios con una precisión superior al mm. Por ello, se calcula el diámetro real del orificio del inyector  $d_{0,real}$  aproximando  $d_0$  a la unidad de mm:

$$d_{0,real} \approx d_0$$

A partir del diámetro real del orificio calculamos su área en  $m^2$ :

$$S_{0,real} = \pi \left( \frac{d_{0,real} [1/1000]}{2} \right)^2 \quad (4.4)$$

El diámetro de la garganta o tubo de mezcla  $d_g$  en mm se obtiene en función del ratio de entrada  $e$  definido por las propiedades de la combustión y que relaciona los diámetros del inyector y la garganta (fórmula de Prigg):

$$d_g = d_{0,real} \left( 1 + \frac{e}{\sqrt{\rho_r}} \right) \quad (4.5)$$

Al igual que en el caso del diámetro del inyector, esta ecuación nos da el diámetro exacto de la garganta, para que entre la cantidad demandada de aire primario (estequiométrica). Sin embargo, en la realidad no existen tubos de cualquier diámetro, si no que se encuentran normalizados. Los tubos de fontanería normalizados y adecuados para el quemador aparecen en la tabla 4.2. Por ello, el diámetro de la garganta estará determinado por el del tubo seleccionado. A efectos prácticos se selecciona el tubo de diámetro normalizado inmediatamente superior. Este criterio nos asegurará diseñar un quemador que aporte una cantidad de aire primario igual o superior a la cantidad estequiométrica. Si seleccionáramos un tubo de diámetro inferior, el ratio de entrada sería menor al deseado, con lo que la cantidad de oxígeno en la combustión podría ser insuficiente, con los inconvenientes que ello conlleva<sup>22</sup>.

Pulgadas (in.)	Diámetro interno equivalente (mm)
1/2'	12,70
3/4'	19,05
1'	25,40
1 y 1/4'	31,75

**Tabla 4.2. Tubos de fontanería normalizados en pulgadas y diámetros equivalentes en mm. Fuente: Elaboración propia**

Por tanto el diámetro real de la garganta  $d_{g,real}$  en mm tomará el valor de la tabla 4.2, inmediatamente superior al  $d_g$  obtenido.

A partir del diámetro real de la garganta calculamos su área en  $m^2$ :

$$S_{g,real} = \pi \left( \frac{d_{g,real} [1/1000]}{2} \right)^2 \quad (4.6)$$

<sup>22</sup> Producción de monóxido de carbono (tóxico) y metano sin quemar, disminución de la temperatura de la llama, disminución de la velocidad de propagación de la llama

La modificación del diámetro teórico de la garganta, modificará consecuentemente el ratio de entrada, ya que al seleccionar un diámetro mayor, creará una depresión superior tras el inyector absorbiendo una mayor cantidad de aire.

$$e_{real} = \sqrt{\rho_r} \left( \sqrt{\frac{d_{g,real}}{d_{0,real}}} - 1 \right) \quad (4.7)$$

El área total disponible para la absorción de aire (área de las lumbreras)  $S_{lt}$  ha de ser similar al área de la garganta  $S_{g,real}$ . Se propone la perforación de cuatro lumbreras en el tubo de mezcla. El área de cada lumbrera será por tanto:

$$S_l = \frac{S_{g,real}}{4} \quad (4.8)$$

Y el diámetro en mm de cada una de ellas  $d_l$  será:

$$d_l = 2 \sqrt{\frac{S_l}{\pi}} [1/1000] \quad (4.9)$$

Sin embargo como se ha comentado para el orificio del inyector, en la mecanización únicamente se admitirán precisiones de unidad de mm. Así definimos el diámetro real de las lumbreras  $d_{l,real}$ :

$$d_{l,real} \approx d_l$$

Y el área total de absorción de aire real  $S_{lt,real}$ :

$$S_{lt,real} = 4 \left[ \pi \left( \frac{d_{l,real} [1/1000]}{2} \right)^2 \right] \quad (4.10)$$

Éste área debe ser similar y superior al área real de la garganta.

La longitud de la garganta  $L_{g,real}$  ha de ser al menos de 10 veces su diámetro:

$$L_g = 10 \cdot d_{g,real} \quad (4.11)$$

Y para la longitud real se aproxima a la unidad de mm:

$$L_{g,real} \approx L_g$$

El caudal total de gases por la garganta  $V'_g$  vendrá dado por:

$$V'_g = V'_{bio} (1 + e_{real}) \quad (4.12)$$

El caudal a través del cabezal del quemador es el mismo que el que circula por la garganta:

$$V'_c = V'_g \quad (4.13)$$

Para que la llama en el cabezal del quemador sea estable, el área deberá ser:

$$S_c = k_{estabilización} \frac{V'_c}{v_p} \quad (4.14)$$

Sin embargo, la constante  $k_{estabilización}$ , depende de la geometría del cabezal y nos es desconocida. Para su cálculo se hace necesario probar experimentalmente diferentes cabezales (Punto 5), y en función de los resultados, proponer unas dimensiones para el cabezal en función del caudal de biogás utilizado.

Una vez se tienen los datos reales del quemador, se calculan los parámetros de funcionamiento. La presión manométrica real en Pa  $p_{m,i,real}$  a la que se ha de inyectar el biogás para conseguir el caudal deseado con el orificio del inyector real vendrá dada por:

$$p_{m,i,real} = \frac{\rho_r}{d_{0,real}^4} \left( \frac{V'_{bio} [3600/1]}{0,00364 \cdot C_f} \right)^2 \quad (4.15)$$

Velocidades del biogás en el orificio del inyector  $v_0$ , y a la entrada de la garganta  $v_g$  en m/s:

$$v_0 = \frac{V'_{bio}}{S_{0,real}} \quad (4.16)$$

$$v_g = v_0 \frac{S_{0,real}}{S_{g,real}} \quad (4.17)$$

Velocidad de la mezcla de gases al final de la garganta y en el cabezal  $v_c$  en m/s:

$$v_c = \frac{V'_c}{S_{g,real}} \quad (4.18)$$

Al modificar los diámetros del inyector y la garganta alteramos el ratio de entrada, por lo que el exceso de aire se verá así mismo modificado:

$$x_{air,real} = \frac{e_{real}(1 + x_{CO})}{9,52} - 1 \quad (4.19)$$

El exceso de aire deberá ser siempre positivo para evitar que la combustión se produzca con menor cantidad de aire del estequiométrico.

Presión de conducción  $\Delta p_i$  en Pa:

$$\Delta p_i = -\rho \frac{v_0^2}{2g} \left[ 1 - \left( \frac{d_{0,real}}{d_{t,real}} \right)^2 \right] \quad (4.20)$$

Caída de presión en el tubo de mezcla  $\Delta p_g$  en Pa:

$$Re_g = \frac{4\rho_m V'_g}{\pi \mu_m d_{g,real}} \quad (4.21)$$

Donde  $\rho_m$  y  $\mu_m$  son la densidad y viscosidad para la mezcla de gases. La caída de presión será:

$$\Delta p_g = \frac{f}{2} \rho_m \frac{16 V_g'^2}{\pi^2 d_{g,real}^5} L_{g,real} \quad (4.22)$$

Donde

$$f = \begin{cases} \frac{64}{Re_g} & \text{Si } Re_g < 2000 \\ \frac{0,316}{Re_g^{1/4}} & \text{Si } Re_g > 2000 \end{cases} \quad (4.23)$$

La caída de presión de la garganta debe resultar muy inferior a la presión de conducción.

#### 4.1.4. Cálculo del quemador para pruebas experimentales

Para realizar las pruebas experimentales se hizo necesario diseñar y construir un quemador adecuado a la potencia (caudal de biogás) requerida para un calentador de biogás. Dado que no se disponen de datos previos acerca de calentadores instantáneos de estas características, se parte de la potencia media consumida por los calentadores eléctricos de ducha (3kW para caudales de agua bajos, con un rendimiento aproximado del 95%). Y se les aplica un rendimiento más acorde al calentador de gas propuesto (en torno a un 50%). Así obtenemos la potencia requerida aproximada como:

$$P_{requerida} [kW] = \frac{3}{0,95} \frac{1}{0,50} = 4,2 \quad (4.24)$$

El caudal necesario de biogás para obtener esa potencia vendrá dado por:

$$P_{requerida} [kW] = PCS_{bio} \rho_{bio} V'_{bio} \quad (4.25)$$

Donde  $PCS_{bio}$  es el poder calorífico superior del biogás utilizado y  $\rho_{bio}$  la densidad. Para la resolución de la ecuación se hizo necesaria la caracterización del lugar de pruebas en términos de parámetros a introducir en el problema. Las pruebas se llevaron a cabo en el Matadero Municipal de Cochabamba<sup>23</sup> y las características medio se resumen en la tabla 4.3.

Así pues, para un biogás con un contenido en metano del 55%, el  $PCS_{bio}$  es de aproximadamente 27.500 kJ/kg. y a 2500 msnm, la densidad del biogás se toma como 0,88 kg/m<sup>3</sup>. Por lo que finalmente el caudal de biogás medio a utilizar para las pruebas queda:

$$V'_{bio} \left[ \frac{m^3}{s} \right] = \frac{P_{requerida}}{PCS_{bio} \rho_{bio}} = 0,00017 \quad (4.26)$$

Con esto se está en disposición de introducir los datos en el problema en MATLAB.

<sup>23</sup> El lugar de las pruebas se describe en el punto 5

Variable	Unidades	Valor por defecto	Explicación
% $CO_2$	-	45	Porcentaje de dióxido de carbono en el biogás utilizado
% $CH_4$	-	55	Porcentaje de metano en el biogás utilizado
$T_{bio}$	°C	25	Temperatura del biogás a la entrada del inyector
$T_{air}$	°C	25	Temperatura del aire que rodea al inyector
$\rho_0$	Kg/m <sup>3</sup>	1,29	Densidad de referencia (Gases: Aire a 0°C y 1 atm)
$x_{air}$	-	0	Exceso de aire en la reacción
$C_f$	-	0,9	Coefficiente de flujo en el inyector
$p_{m,i}$	Pa	1000	Presión manométrica previa al paso por el inyector
Altitud	msnm	2500	Altitud sobre el nivel del mar
$v_p$	m/s	0,25	Velocidad de propagación de la llama para el biogás
$g$	m/s <sup>2</sup>	9,81	Aceleración de la gravedad

**Tabla 4.3. Valor de las variables del quemador para pruebas experimentales. Fuente: Elaboración propia**

Dimensiones del quemador			
	Exacto	Real	Unidad
Diámetro del orificio del inyector	2,20	2	mm
Diámetro de la garganta	14,75	19,05 (¾')	mm
Longitud de la garganta	190,5	191	mm
Diámetro de las lumbreras	9,52	10	mm
Área total de la garganta	-	0,000285	m <sup>2</sup>
Área total de absorción	-	0,000314	m <sup>2</sup>
Parámetros de funcionamiento			
Presión manométrica real en el inyector		1470	Pa
Velocidad del gas en el inyector		54,11	m/s
Velocidad del gas en la entrada de la garganta		0,60	m/s
Velocidad del gas al final de la garganta y el cabezal		5,26	m/s
Exceso de aire		0,42	-
Presión de conducción		-128,27	Pa
Caída de presión en la garganta		4,57	Pa

**Tabla 4.4. Resultados del problema para el quemador experimental. Fuente: Elaboración propia**

A partir de los resultados que se muestran en la tabla 4.4 se construye el inyector para la realización de las pruebas<sup>24</sup>. No obstante queda por determinar la forma y dimensiones del cabezal. Para ello se acoplarán a los elementos diseñados diferentes geometrías. También se realiza una prueba para determinar la efectividad del quemador en función del área total de absorción.

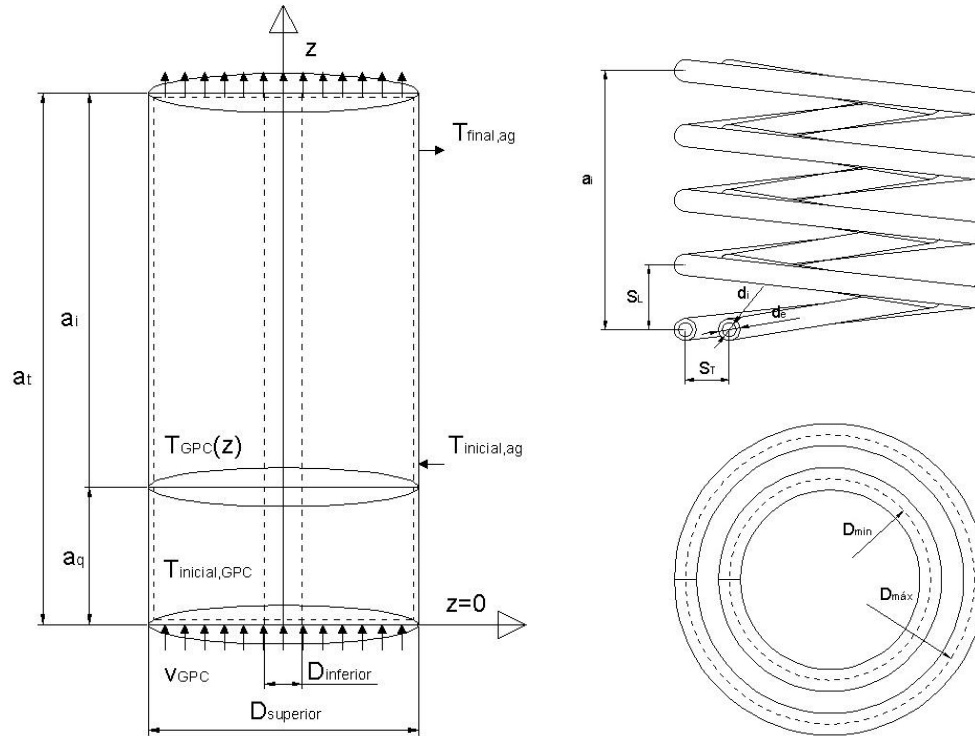
## 4.2. Modelado del intercambiador

Para el cálculo de los principales parámetros involucrados en el proceso del calentamiento del agua se desarrolló un modelo en MATLAB, corregido posteriormente con resultados experimentales para que los resultados teóricos se aproximaran a los resultados reales.

<sup>24</sup> Planos del inyector diseñado y los cabezales utilizados en ANEXO C

### 4.2.1. Descripción general y geometría

Dadas la forma seleccionada para el intercambiador (bobinados concéntricos), se seleccionó como punto de partida una geometría cilíndrica definida por un diámetro máximo y separado en la dirección axial en dos zonas tal y como se muestra en la figura 4.2



**Ilustración 4.2. Esquema general del modelo (izqda.) y esquema del intercambiador (dcha.). Fuente: Elaboración propia**

Se toma como punto de referencia,  $z = 0$ , la salida de los gases del cabezal del quemador, por lo que todas las cotas se toman a partir de esta referencia. El diámetro máximo utilizado  $D_{superior}$  (200mm), está definido por el diámetro aproximado de la carcasa metálica utilizada en las pruebas<sup>25</sup>. El diámetro inferior,  $D_{inferior}$  (50 mm), se toma como el mínimo diámetro al que se puede doblar un tubo de cobre en forma de helicoide sin provocar modificaciones en su diámetro interno. Es decir, no se puede conformar una hélice para el intercambiador con un diámetro menor. La altura  $a_q$ , es la altura a la que se sitúa la parte más inferior del intercambiador definida por defecto en 100mm ya que a una distancia menor los GPC podrían provocar daños en el intercambiador. La altura  $a_t$  es la altura total del modelo, que viene dada por:

$$a_t = a_q + a_i \quad (4.27)$$

Donde  $a_i$ , es la altura del intercambiador y depende del número de espiras utilizadas.

Como se ha comentado previamente el intercambiador se compone de una serie de bobinados concéntricos tal y como se muestra en la ilustración 4.2. El intercambiador como tal queda definido por una serie de parámetros:

- $n$ : Número de espiras por bobina. Para una geometría helicoidal una espira corresponderá con una vuelta completa.
- $l$ : Número de bobinas concéntricas utilizadas en el intercambiador.
- $S_T$ : Distancia en dirección radial entre dos tubos consecutivos. También se puede definir como la diferencia de radios de dos bobinados concéntricos consecutivos.

<sup>25</sup> La selección del tamaño de la carcasa de pruebas responde a criterios meramente prácticos. Se supuso inicialmente que un cilindro de 20 cm de diámetro era más que suficiente para alojar la cantidad de serpentín necesaria (unos 10 metros). Además los calentadores de gas domésticos tienen una sección para el intercambiador similar.

- $S_L$ : Distancia en dirección axial entre dos tubos consecutivos. Define cada helicoide individualmente junto con su diámetro.
- $D_{m\acute{a}x}$ : Diámetro del bobinado más externo.
- $d_i$ : Diámetro interno del tubo.
- $d_e$ : Diámetro externo del tubo.

A partir de estas dimensiones se calculan el resto de parámetros de la siguiente forma:

$$a_i = n \cdot S_L \quad (4.28)$$

$$D_{min} = D_{m\acute{a}x} - 2 \cdot ((l - 1) \cdot S_T) \quad (4.29)$$

Se establecen así mismo una serie de restricciones:

$$D_{m\acute{a}x} < D_{superior} \quad (4.30)$$

El diámetro máximo utilizado para una espira no puede superar el establecido para el modelo, y a su vez determinado por las pruebas experimentales.

$$S_L < 3d_e/2 \quad y \quad S_T < 3d_e/2 \quad (4.31)$$

Debe existir una distancia mínima entre dos tubos consecutivos de al menos medio diámetro. Esto se establece así porque para distancias menores los GPC podrían no atravesar el intercambiador a través de los tubos, si no desviándose por el lateral, lo que disminuiría su eficiencia.

$$D_{min} > D_{inferior} \quad (4.32)$$

El diámetro para la bobina más interior debe ser superior a  $D_{inferior}$ , ya que en caso contrario su conformado se haría imposible.

#### 4.2.2. Caracterización de los fluidos involucrados

Para este problema se trabajarán con dos fluidos diferentes a la hora de tener en cuenta sus propiedades: los gases de combustión (GPC) y el fluido calorportador (agua) que circulará por el interior del intercambiador.

Para los GPC se presuponen una serie de premisas que simplifican el proceso de cálculo:

- Los GPC generados en la combustión en el quemador atraviesan esta geometría en dirección axial y sentido positivo.
- Está compuesto por  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$  y sus proporciones relativas en los GPC dependen del exceso de aire en la reacción  $x_{air}$ , así como del contenido de dióxido de carbono en el biogás  $x_{CO}$ . Las fórmulas para la obtención de estas proporciones se deducen en el ANEXO B
- El caudal de los GPC,  $V'_{GPC}$ , es proporcional al caudal utilizado de biogás  $V'_{bio}$ . Y esta constante de proporcionalidad viene determinada por la cantidad de aire introducido en la reacción (Aire primario + aire secundario) y la proporción de metano en el biogás<sup>26</sup>:

$$V'_{GPC} = x_{GPC} V'_{bio} \quad (4.33)$$

- La velocidad de los GPC se supone homogénea en toda la geometría e igual a:

$$v_{GPC} = \frac{V'_{GPC}}{\left(\frac{\pi D_{superior}^2}{4}\right)} \quad (4.34)$$

- La temperatura de los GPC se supone constante en el espacio comprendido por  $z \in (0, a_t)$  e igual a  $T_{inicial, GPC}$ , de determinación experimental; por encima de este espacio la temperatura de los GPC disminuye a medida que atraviesa el intercambiador.
- No se consideran las pérdidas de carga de este fluido al atravesar el intercambiador.

Para el agua que entra al intercambiador también se suponen una serie de premisas:

- El caudal de alimentación de agua  $V'_{ag}$  se considerará constante y será un parámetro determinado por el usuario.
- La velocidad del agua para cualquier punto del tubo es:

<sup>26</sup> Ver apartado de la combustión en el ANEXO B

$$v_{ag} = \frac{V'_{ag}}{\left(\frac{\pi d_i^2}{4}\right)} \quad (4.35)$$

- El agua entra al intercambiador a una temperatura  $T_{inicial,ag}$ , en dirección radial y a una cota determinada por la dirección que vaya a tomar el flujo en el intercambiador (contracorriente o a favor de corriente). Y sale a una temperatura  $T_{final,ag}$ , también en dirección radial y a una cota que también dependerá de la geometría del intercambiador. El incremento de temperatura vendrá determinado por:

$$\Delta T_{ag} = T_{final,ag} - T_{inicial,ag} \quad (4.36)$$

- No se consideran las pérdidas de carga de este fluido al atravesar el intercambiador.

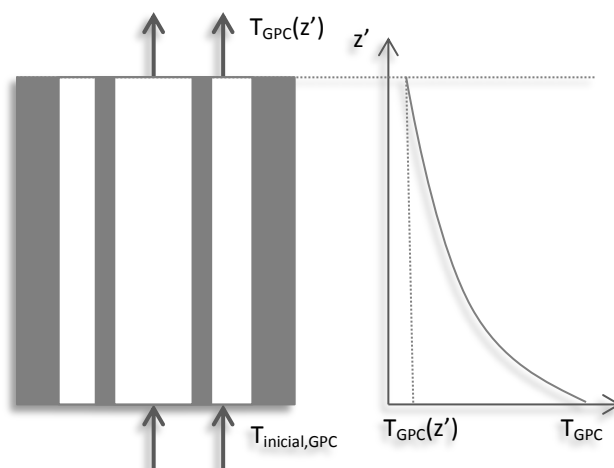
El cálculo de las propiedades para mezclas de distintos gases se realiza tal y como se explica en el ANEXO B. En el cálculo de propiedades también se tiene en cuenta la variación de la densidad de los gases con la altura.

### 4.2.3. Método $\epsilon$ -NTU. Cálculo de la temperatura de los GPC.

Una vez definido el problema y caracterizado cada uno de los fluidos que intervienen en él, se procede al cálculo aproximado de la temperatura de los GPC. Este cálculo se lleva a cabo a utilizando el método  $\epsilon$ -NTU<sup>27</sup>. Para resolver el problema de esta manera se tienen en cuenta varias suposiciones:

- Se supone un intercambiador simple de un paso, flujo paralelo y a favor de corriente.
- La superficie de intercambio es proporcional a la longitud del intercambiador
- El flujo másico del fluido interno (agua) será igual al flujo másico que entra al intercambiador, por el número de bobinados concéntricos.
- La temperatura de los GPC, únicamente variará con la longitud del intercambiador, es decir, con la coordenada  $z'$ , ( $z' = z + a_q$ ).
- Las propiedades de ambos fluidos se tomarán a una temperatura media de 25°C para el agua y 300°C para los GPC.
- En el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor  $U$ , solamente se tendrá en cuenta el efecto convectivo externo, ya que es mucho menor que la convección interna y la conducción, lo que hace despreciable estos últimos.

Así pues nos quedará un intercambiador simple tal y como muestra la Ilustración 4.3.



**Ilustración 4.3. Simplificación del intercambiador para el cálculo de la temperatura de los GPC con la altura. Fuente: Elaboración propia**

En primer lugar calculamos el área de intercambio de calor aproximada, en función de la altura  $z'$  del intercambiador. Para una curva helicoidal, existe una relación entre el ángulo girado (Ilustración 4.4)

<sup>27</sup> Toda la teoría relacionada con este método aparece en el ANEXO B

y su altura. Así si suponemos una hélice de radio  $R$ , y separación entre espiras consecutivas de  $S_L$  relativamente pequeña respecto a  $R$ , tendremos que si para  $\varphi = 0$ ,  $z' = 0$ , cuando se recorre el ángulo completo ( $2\pi$ ), alcanzamos una cota  $S_L$ . La relación entre la altura y el ángulo girado será por tanto:

$$z' = \frac{S_L}{2\pi} \varphi \quad (4.37)$$

Por otro lado se tiene que:

$$L = R \cdot \varphi \quad (4.38)$$

Así despejando de la primera ecuación y sustituyendo en la segunda obtenemos:

$$L = R \cdot \frac{2\pi}{S_L} z' \quad (4.39)$$

El área externa de un cilindro de longitud  $L$  y diámetro externo  $d_e$  viene dada por:

$$A = \pi d_e L \quad (4.40)$$

Sustituyendo la expresión de la longitud de la curva helicoidal y reordenando, obtenemos el área externa de una bobina de altura  $z'$ :

$$A = 2\pi^2 \frac{d_e R z'}{S_L} \quad (4.41)$$

En el caso de tener varias bobinas concéntricas, si únicamente variamos el radio de la hélice  $R$ , el área de cada una de ellas será:

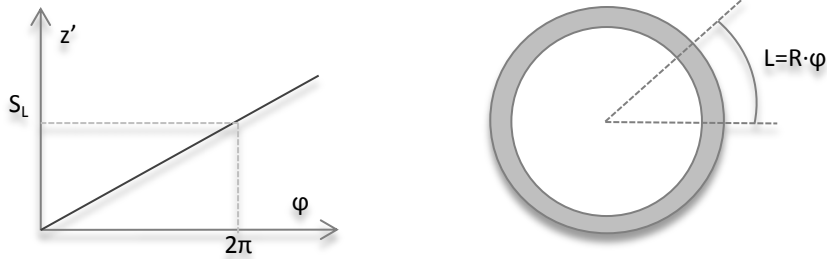
$$A_i = 2\pi^2 \frac{d_e R_i z'}{S_L} \quad (4.42)$$

Y por tanto la superficie total para  $l$  espiras concéntricas será la suma de cada superficie individual:

$$A = \sum_{i=1}^l 2\pi^2 \frac{d_e R_i z'}{S_L} = 2\pi^2 \frac{d_e z'}{S_L} \sum_{i=1}^l R_i = b \cdot z' \quad (4.43)$$

Siendo  $b$  la constante de proporcionalidad e igual a:

$$b = 2\pi^2 \frac{d_e}{S_L} \sum_{i=1}^l R_i \quad (4.44)$$



**Ilustración 4.4. Relación entre el ángulo girado y la altura en una curva helicoidal. Fuente: Elaboración propia**

La utilización del método  $\varepsilon$ -NTU, requiere del cálculo previo, tanto del NTU, o número de unidades de transmisión, como de la relación de capacidad  $C^*$ . Esta última viene dada por la relación:

$$C^* = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (0 \leq C^* \leq 1) \quad (4.45)$$

Dónde  $C_{min}$  es la razón de capacidad calorífica menor de uno de los fluidos, y  $C_{max}$  la mayor, del otro fluido. Esta es la razón por la cual esta relación únicamente toma valores comprendidos entre 0 y 1. Dados los fluidos involucrados, tenemos que el  $C_{max}$  corresponde al agua y el  $C_{min}$  a los GPC. Por tanto:

$$C^* = \frac{C_{GPC}}{C_{ag}} \quad (4.46)$$



Con:

$$C_{GPC} = m'_{GPC} \cdot C_{p,GPC} = \rho_{GPC} V'_{GPC} \cdot C_{p,GPC} \quad (4.47)$$

$$C_{ag} = m'_{ag} \cdot C_{p,ag} = \rho_{ag} V'_{ag} \cdot C_{p,ag} \quad (4.48)$$

Por otro lado, el  $NTU$  se calcula:

$$NTU = \frac{UA}{C_m} \quad (4.49)$$

Inicialmente se desprecian los coeficientes de transmisión de calor relativos a la conducción y a la convección externa, ya que su influencia sobre el coeficiente global de transferencia de calor es despreciable. Posteriormente se tienen en cuenta en el cálculo de la temperatura del agua (punto 4.2.4). Así pues:

$$U = h_e \quad (4.50)$$

Para el cálculo del coeficiente de convección externa  $h_e$  suponemos un flujo transversal a través de un banco de tubos. Esto es así cuando existen varias bobinas concéntricas, y los GPC, las atraviesan longitudinalmente. El número de Nusselt, vendrá dado por la expresión:

$$Nu_{d,banco} = \frac{hd}{k} = CRe_{d,max}^n Pr^{0,36} \quad (4.51)$$

Donde el número de Reynolds se toma a la velocidad máxima que alcanzan los gases al atravesar el intercambiador. Dado que el valor que toma el Reynolds se encuentra entre 10 y 100, los coeficientes  $C$  y  $n$  tomarán los valores 0,8 y 0,4 respectivamente.

Así se obtendrá el coeficiente de convección externa  $h_e$  como:

$$h_e = FC_{exp,e} \cdot FC_{profundidad} \cdot \frac{k_{GPC} \cdot Nu_{d,banco}}{d_e} \quad (4.52)$$

El  $FC_{profundidad}$  es un factor de corrección relativa a la profundidad del intercambiador, es decir, proporcional al número de espiras  $n$ , por bobina. El  $FC_{exp,e}$  introduce para adaptar los resultados teóricos a los experimentales en caso necesario. Su modificación supondría un aumento o disminución de la cantidad de calor transmitida por los gases. Para los cálculos previos este factor de corrección toma como valor la unidad, pero en caso necesario se modifica para adaptar los resultados del modelo a los obtenidos experimentalmente.

Una vez calculado el valor del  $h_e$  y teniendo en cuenta la relación del área de intercambio  $A$  con la altura del intercambiador, podemos escribir:

$$NTU = \frac{h_e b}{C_{GPC}} z' \quad (4.53)$$

La efectividad  $\varepsilon$ , viene dada por:

$$\varepsilon = \frac{Q'}{Q'_{max}} = \frac{C_{GPC} \cdot (T_{inicial,GPC} - T_{GPC}(z'))}{C_{GPC} \cdot (T_{inicial,GPC} - T_{inicial,ag})} \quad (4.54)$$

Por otro lado la relación de efectividad correspondiente a un intercambiador simple de un único paso y flujo a favor de corriente es:

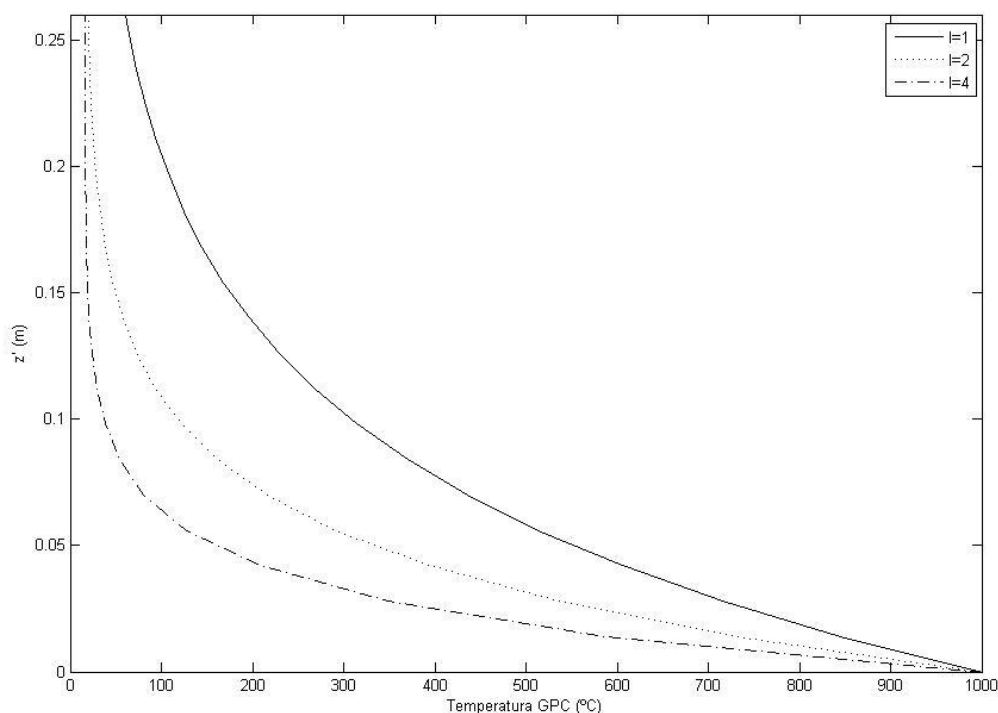
$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-(NTU \cdot (1 - C^*))}}{(1 + C^*)} \quad (4.55)$$

Igualando ambas ecuaciones, sustituyendo los valores de  $NTU$  y  $C^*$ , y despejando  $T_{GPC}(z')$  obtenemos:

$$T_{GPC}(z') = T_{inicial,GPC} - (T_{inicial,GPC} - T_{inicial,ag}) \frac{1 - e^{-\left[\frac{h_e b}{C_{GPC}} z' \left(1 - \frac{C_{GPC}}{C_{ag}}\right)\right]}}{\left(1 + \frac{C_{GPC}}{C_{ag}}\right)} \quad (4.56)$$

Esta es la relación que nos da la temperatura de los gases, en función de la altura del intercambiador para unas temperaturas de entrada de los fluidos dadas.

Implementando este problema en MATLAB, obtenemos la temperatura de los GPC para cada punto requerido.



**Ilustración 4.5.** Representación gráfica en MATLAB de la temperatura de los GPC en función de la altura para diferente número de bobinados concéntricos. Fuente: Elaboración propia

$d_e = 7\text{mm}$ ,  $S_T = 14\text{mm}$ , Altitud = 1500m  $V'_{ag} = 3\text{L/min}$ ,  $T_{\text{inicial,ag}} = 15^\circ\text{C}$ ,

$T_{\text{inicial,GPC}} = 1000^\circ\text{C}$ ,  $V'_{\text{bio}} = 0,00030\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $n = 20$

En la Ilustración 4.5 se muestra un ejemplo de los resultados para unos determinados parámetros de entrada. Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

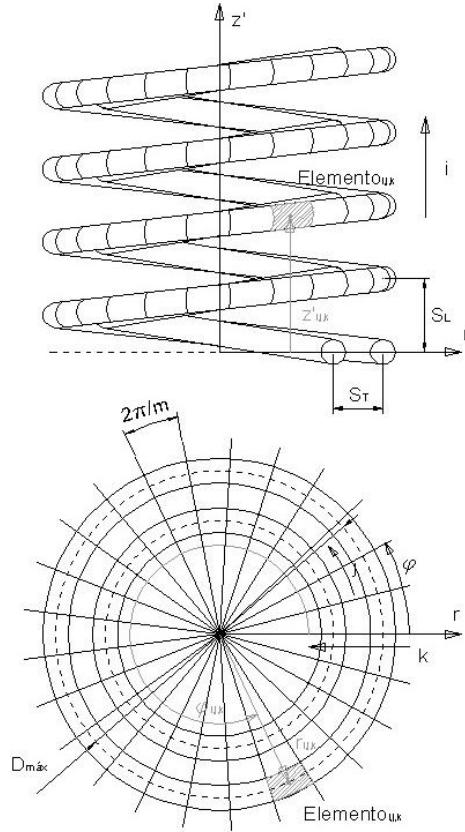
- La temperatura de los GPC desciende de manera muy notable en los primeros centímetros de intercambiador. Esto se debe a que la capacidad calorífica del agua es muy superior a la de los gases, por lo que la temperatura de los gases disminuye mucho más rápido que aumenta la del agua.
- La temperatura de salida de los GPC, es prácticamente igual a la temperatura inicial del agua ( $15^\circ\text{C}$ ) para una longitud equivalente a 20 espiras. Esto quiere decir que por más que alargásemos el intercambiador (añadiendo más espiras) no se conseguiría una mejora de la eficiencia, ya que el gradiente entre ambos fluidos sería prácticamente nulo, y no habría intercambio de calor.
- A medida que añadimos bobinas concéntricas, vemos que la temperatura de los gases desciende más rápidamente. Esto es así porque los GPC calientan un mayor flujo de agua cuanto mayor es el número de bobinas, perdiendo así energía a mayor velocidad. Vemos así que para 2 bobinas concéntricas se alcanza aproximadamente la temperatura de inicio del agua a los 20 cm, mientras que para 4 bobinas, a los 10 cm.

La adición de bobinados concéntricos implica una reducción en su número de espiras, ya que de lo contrario estaríamos alargando inútilmente el intercambiador.

Estos resultados nos dan una idea acerca de la temperatura aproximada de los GPC en el interior del calentador en función de la altura, pero no podemos sacar conclusiones acerca de la temperatura de salida del agua, debido a que no se tienen en cuenta los efectos de la radiación, y por tanto una medida de la efectividad. Para ello se plantea el modelo que sigue por elementos finitos.

#### 4.2.4. Método por elementos finitos. Cálculo de la temperatura del agua

Con este planteamiento se pretende calcular la temperatura del agua en cada punto del serpentín, partiendo de las temperaturas de los GPC calculadas en el problema anterior y teniendo en cuenta, además de la radiación, la convección interna, y la conducción a través de la pared de los tubos.



**Ilustración 4.6. Esquema de división del intercambiador en elementos finitos. Fuente: Elaboración propia**

Para ello se divide el intercambiador en elementos individuales sobre los que realizar los cálculos unitarios. Partiendo de la geometría helicoidal múltiple, se obtienen cada elemento  $i, j, k$  dividiendo el intercambiador en  $n$  espiras por bobina,  $m$  elementos por espira y  $l$  bobinas concéntricas. Si tomamos coordenadas cilíndricas:

- $i$ : hace referencia a la espira en la que se encuentra el elemento, varía desde 1, para la espira inferior, hasta  $n$  en la espira superior. Está relacionada directamente con la coordenada  $z'$ .
- $j$ : hace referencia a la posición del elemento dentro de una misma espira, varía desde 1, para el elemento de menor ángulo, hasta  $m$ , para el elemento de mayor ángulo. Está relacionado directamente con la coordenada  $\varphi$ .
- $k$ : hace referencia al bobinado en que se encuentra el elemento, varía desde 1, para la bobina más externa, hasta  $l$  para la bobina más interna. Está relacionado inversamente con la coordenada  $r$ .

A cada elemento  $i, j, k$  le corresponden unas coordenadas que vienen dadas por las siguientes relaciones:

$$r^{i,j,k} = \left( \frac{D_{max}}{2} \right) - S_T(k-1) \quad (4.56)$$

$$\varphi^{i,j,k} = (j-1) \left( \frac{2\pi}{m} \right) \quad (4.57)$$

$$z'^{i,j,k} = S_L(i-1) + \left[ \frac{S_L(j-1)}{m} \right] \quad (4.58)$$

Si se transforman estas coordenadas a un sistema cartesiano quedará:

$$x^{i,j,k} = r^{i,j,k} \cos(\varphi^{i,j,k}) \quad (4.59)$$

$$y^{i,j,k} = r^{i,j,k} \sin(\varphi^{i,j,k}) \quad (4.60)$$

$$z'^{i,j,k} = z^{i,j,k} \quad (4.61)$$

Esta transformación es útil para la representación del modelo en 3D en MATLAB, tal y como se verá más adelante.

Cada elemento unitario se toma como un tubo de eje rectilíneo de diámetro interno  $d_i$  y externo  $d_e$  cuya longitud viene dada por la expresión:

$$L^{i,j,k} = r^{i,j,k} \cdot \frac{2\pi}{m} \quad (4.62)$$

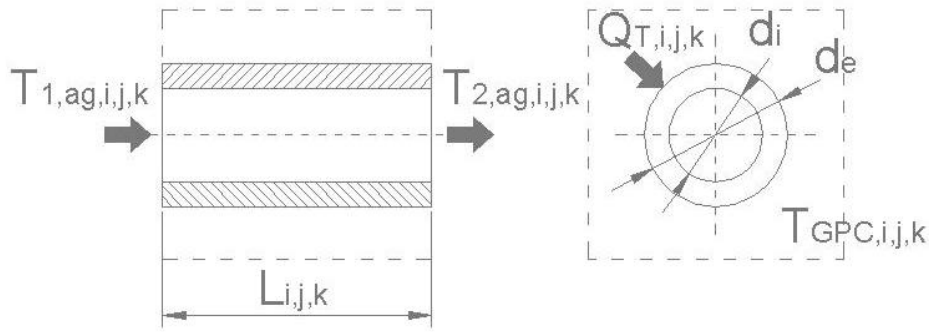
Así pues podemos calcular el área referida tanto a la superficie externa como a la superficie interna del tubo como:

$$A_e^{i,j,k} = \pi d_e L^{i,j,k} \quad (4.63)$$

$$A_i^{i,j,k} = \pi d_i L^{i,j,k} \quad (4.64)$$

Una vez se tiene definida la posición y geometría del elemento unitario se procede a la resolución del problema de transmisión de calor individualmente. Como se ha comentado, el calor transferido al agua tiene una componente convectiva y otra radiante, por lo tanto el calor total transferido vendrá dado por:

$$Q_T^{i,j,k} = Q_{conv}^{i,j,k} + Q_{rad}^{i,j,k} \quad (4.65)$$



**Ilustración 4.7. Esquema de elemento unitario del intercambiador. Fuente: Elaboración propia**

Se parte de un sistema como el que se muestra en la ilustración 4.7, en el que se conocen la posición del elemento  $i, j, k$ , el caudal de agua  $V'_{ag}$ , así como su temperatura de entrada  $T_{1,ag}^{i,j,k}$ . Dado que se conoce la posición del elemento en cuestión ( $z'^{i,j,k}$ ), se calcula previamente la temperatura de los GPC que lo rodean a través del procedimiento explicado en el apartado anterior:

$$T_{GPC}^{i,j,k} = T_{inicial, GPC} - (T_{inicial, GPC} - T_{inicial, ag}) \frac{1 - e^{-\left[ \frac{h_e b}{C_{GPC}} z'^{i,j,k} \cdot \left( 1 - \frac{C_{GPC}}{C_{ag}} \right) \right]}}{\left( 1 + \frac{C_{GPC}}{C_{ag}} \right)}$$

Una vez que se tienen las temperaturas del agua y los GPC, se recalculan sus propiedades. Para el agua se calculan a  $T_{1,ag}^{i,j,k}$ , ya que el incremento de temperatura en el elemento diferencial se supone tan pequeño que su influencia sobre las propiedades no resulta apreciable. Para los GPC se toma la temperatura calculada para  $z'^{i,j,k}$ .

Con las propiedades calculadas para cada uno de los fluidos, se está en disposición de calcular el calor transferido por convección y radiación hacia cada elemento diferencial.

El calor transferido por convección viene dado por:

$$Q_{conv}^{i,j,k} = \frac{T_{GPC}^{i,j,k} - T_{1,ag}^{i,j,k}}{R_{total}} \quad (4.65)$$

Como se ha comentado, la temperatura de salida del agua es muy similar a la de entrada (apenas unas centésimas de grado si  $m$  es grande), con lo que el error al calcular el calor con la temperatura inicial, en vez de con la promediada entre la entrada y la salida es ínfimo teniendo en cuenta la diferencia de temperaturas con los GPC.

La  $R_{total}$ , es la resistencia total a la transmisión de calor a través de la pared del tubo, por lo que viene dada por:

$$R_{total} = R_{cond} + R_{conv,e} + R_{conv,i} \quad (4.66)$$

Es decir, la suma de las resistencias térmicas debidas a la conducción en el tubo, la convección externa y la convección interna respectivamente. La primera de ellas se calcula fácilmente recurriendo a la fórmula de la resistencia a la conducción para geometría cilíndrica:

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right)}{2\pi L^{i,j,k} k} \quad (4.67)$$

Donde  $k$  es el coeficiente de resistencia a la conducción del material utilizado para el intercambiador.

Para la resistencia correspondiente a la convección externa se utilizan las mismas ecuaciones dadas para el cálculo de la temperatura de los GPC en el apartado anterior.

$$Nu_{d,banco} = \frac{hd}{k} = C Re_{d,max}^n Pr^{0,36}$$

Los Coeficientes  $C$  y  $n$  tomarán los valores 0,8 y 0,4 respectivamente. En este caso:

$$h_e = FC_{profundidad} \cdot \frac{k_{GPC} \cdot Nu_{d,banco}}{d_e}$$

Se elimina el  $FC_{exp,e}$  ya que sería redundante. La resistencia debida a la convección externa vendrá dada finalmente por:

$$R_{conv,e} = \frac{1}{h_e \cdot A_e^{i,j,k}} \quad (4.68)$$

Para el cálculo de la resistencia debida a la convección interna se tienen en cuenta los efectos de la curvatura del flujo en el serpentín. Así se calcula el ratio de curvatura para cada elemento individualmente como:

$$\vartheta = \frac{d_i}{2r^{i,j,k}} \quad (4.69)$$

El número de Nusselt para un flujo completamente desarrollado en un tubo circular rectilíneo es la dada por Dittus y Boelter:

$$Nu_{d,lineal} = 0,023 Re_d^{0,8} Pr^{0,4} \quad (4.70)$$

Este número se corrige para aplicarlo a tubos helicoidales utilizando el ratio de curvatura. Para cálculos previos para caudales de agua de entre 1 y 3 L/min (los utilizados en la práctica) se obtienen números de Reynolds de entre 5000 y 13000, por lo que recurrimos a la ecuación de Pratt:

$$Nu_{d,helicoidal} = Nu_{d,lineal} \cdot (1,0 + 3,4\vartheta) \quad (4.71)$$

De forma análoga al coeficiente externo, calculamos el coeficiente de convección para el lado del agua:

$$h_i = FC_{exp,i} \cdot \frac{k_{ag} \cdot Nu_{d,helicoidal}}{d_i} \quad (4.72)$$

Y la resistencia:

$$R_{conv,i} = \frac{1}{h_i \cdot A_i^{i,j,k}} \quad (4.73)$$

Se introduce el  $FC_{exp,i}$  por si hubiera que realizar correcciones en base a los resultados experimentales.

Para el cálculo aproximado del calor transmitido por los GPC por radiación y absorbido por los tubos se tienen en cuenta varias simplificaciones:

- Se toma la temperatura exterior del tubo para cada elemento  $i, j, k$  igual a la  $T_{1,ag}^{i,j,k}$ . Esto es así porque además de ser prácticamente la temperatura media del agua en el elemento

como se ha comentado, dadas las condiciones de transferencia de calor (coeficiente de transferencia de calor externa muy bajo en comparación con los otros dos), el mayor gradiente de temperatura se produce de la pared exterior del tubo hacia fuera, y no hacia dentro, por lo que la temperatura superficial del tubo es muy similar a la del fluido interno.

- A efectos prácticos sólo se tiene en cuenta la radiación emitida por los GPC que se encuentran por debajo del intercambiador, es decir, los delimitados por el quemador ( $z = 0$ ) y el inicio del intercambiador ( $z = a_q$ ) y que se suponen a temperatura constante e igual a  $T_{inicial, GPC}$ . Para los gases que circulan por entre los tubos del intercambiador no se tiene en cuenta este efecto.
- Al igual que sólo se considera emisores de radiación a los GPC contenidos entre el quemador y el intercambiador, se tendrá que esta radiación será absorbida únicamente en la parte baja del intercambiador. Por la disposición geométrica se tendrá que para  $i = 1$ , se absorberá un 75%, y para  $i = 2$ , un 25%. Para espiras por encima de  $i = 2$ , no se considerarán los efectos de la radiación.

Así pues, el calor transferido por los GPC, hacia un único elemento diferencial será:

$$Q_{rad}^{i,j,k} = h_{gr} \alpha A_e^{i,j,k} (T_{inicial, GPC} - T_{1, ag}^{i,j,k}) \quad (4.74)$$

Donde  $\alpha$  es la absorptividad (igual a la emisividad) del material utilizado en el intercambiador. El coeficiente de transmisión de calor para gases triatómicos  $h_{gr}$  se toma para un espesor de gases igual a  $a_q$  (100 mm), lo cual nos da una recta aproximada por regresión de:

$$h_{gr} = 0,0351 \cdot T_{inicial, GPC} - 4,9239 \quad (4.75)$$

Una vez calculado el calor total transferido al elemento  $i, j, k$ ,  $Q_T^{i,j,k}$ , resulta sencillo calcular la temperatura de salida del agua  $T_{2, ag}^{i,j,k}$ :

$$T_{2, ag}^{i,j,k} = T_{1, ag}^{i,j,k} + \frac{Q_T^{i,j,k}}{\rho_{ag} C_{p, ag} V'_{ag}} \quad (4.76)$$

Y la temperatura aproximada de la superficie interior del tubo:

$$T_{s, i}^{i,j,k} = \left( \frac{T_{1, ag}^{i,j,k} + T_{2, ag}^{i,j,k}}{2} \right) + R_{conv, i} Q_T^{i,j,k} \quad (4.77)$$

Aunque como se ha dicho, la resistencia a la convección interna es pequeña, por lo que esta temperatura superficial es similar a la media del fluido.

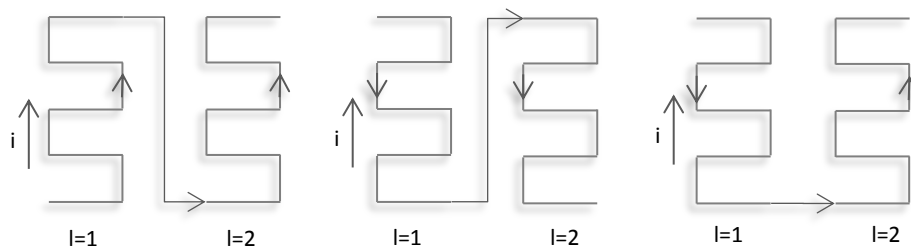
Para el cálculo sucesivo de cada uno de los elementos se toma un punto de partida en el que se conoce  $T_{1, ag}^{i,j,k}$ , que será aquel por el que entra el agua al intercambiador y tomará el valor  $T_{inicial, ag}$  conocido. Los siguientes elementos se irán calculando de forma sucesiva tomando como premisa que:

$$T_{1, ag}^{siguiente} = T_{2, ag}^{anterior}$$

Es decir que la temperatura de entrada del siguiente elemento es igual a la temperatura de salida del agua del elemento anterior. Este orden de cálculo depende del sentido que se tome para el flujo del agua en el intercambiador. Como norma general, se toma siempre la circulación del fluido desde el serpentín más externo hacia el interior es decir, en el sentido positivo de la variable  $k$ . Para el programa se establecen tres sentidos para el flujo en el serpentín:

- **A favor de corriente.** En los serpentines el fluido tiene siempre el mismo sentido en el eje  $z$ , que los GPC, es decir ascendente. El fluido entra por la parte inferior del intercambiador y recorre el serpentín más externo de abajo a arriba, luego desciende en línea recta y vuelve a entrar en el serpentín siguiente por la parte inferior, y así sucesivamente.
- **A contracorriente.** En los serpentines el fluido tiene siempre sentido opuesto en el eje  $z$ , a los GPC, es decir descendente. El fluido entra por la parte superior del intercambiador y recorre el serpentín más externo de arriba abajo, luego asciende en línea recta y vuelve a entrar en el serpentín siguiente por la parte superior, y así sucesivamente.
- **Mixto.** En los serpentines el fluido puede tener el mismo sentido u opuesto a los GPC. Se considera siempre que para el serpentín más externo entra por la parte superior y lo recorre a contracorriente. Después en la parte inferior, pasa al siguiente serpentín y asciende a favor de corriente, y así sucesivamente.

Nótese, que para los dos primeros casos se necesita una cantidad extra de tubo para realizar los empalmes entre los serpentines (ascensos y descensos rectos) que no se tienen en cuenta en el intercambio. En la ilustración 4.8 aparece un esquema de cada modelo para facilitar su comprensión.



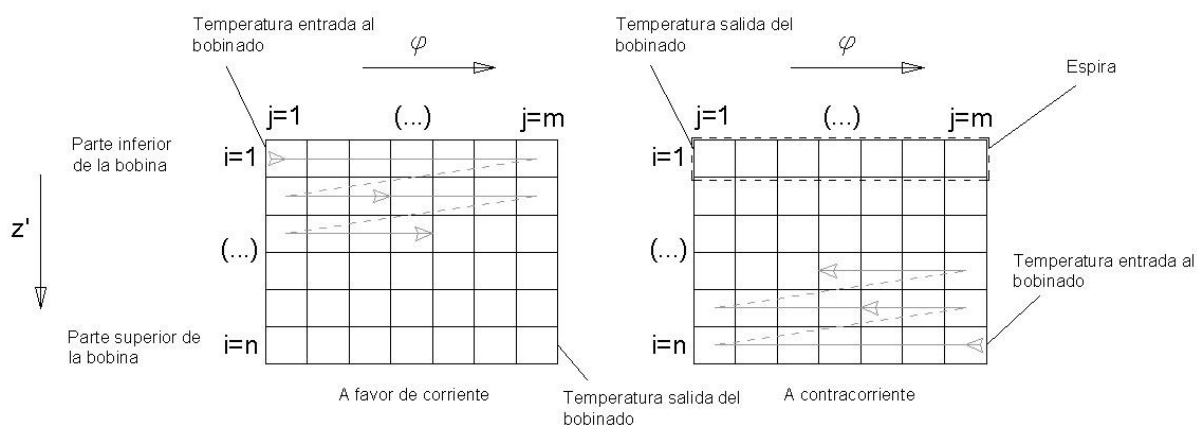
**Ilustración 4.8. Configuraciones de flujo del intercambiador. Fuente: Elaboración propia**

En sentido matemático el cálculo de los elementos supone ir rellenando los elementos de una matriz cúbica de dimensiones  $m \times n \times l$ . El orden en el que se rellena esta matriz queda definido por la dirección del flujo. Como se ha comentado, el flujo discurre siempre de la bobina más externa al interior, por lo que siempre se realizan los cálculos en sentido positivo de  $k$ . Sin embargo existen diferencias, para una misma bobina, si la circulación es a favor de corriente o a contracorriente.

- **A favor de corriente:** Se comienza desde  $i = 1$  hasta  $i = n$ , y en una misma espira en sentido contrario a las agujas del reloj, es decir, desde  $j = 1$ , hasta  $j = m$ .
- **A contracorriente:** Se comienza desde  $i = n$  hasta  $i = 1$ , y en una misma espira en sentido de las agujas del reloj, es decir, desde  $j = m$ , hasta  $j = 1$ .

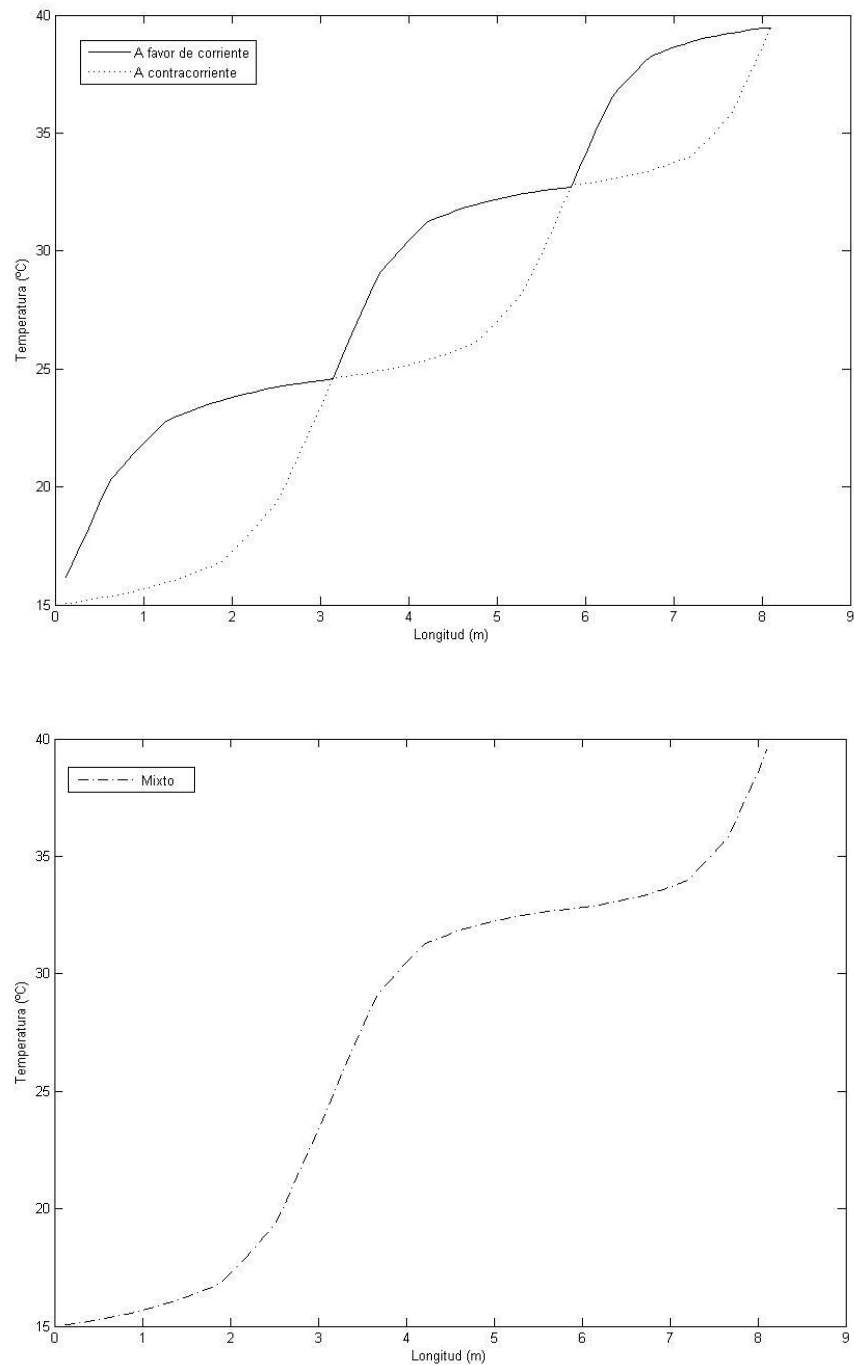
Esto es así porque la temperatura que se conoce de partida es la de entrada a cada bobinado, y en el caso de a favor de corriente es  $T_{1,ag}^{1,1,k}$ , mientras que a contracorriente,  $T_{1,ag}^{n,m,k}$ . En la ilustración 4.9 se muestra el proceso de cálculo (línea gris claro) para un bobinado  $k$  arbitrario.

Se toma como temperatura de entrada de la siguiente bobina la temperatura de salida de la anterior, o lo que es lo mismo, la del último elemento calculado.



**Ilustración 4.9. Esquema del proceso de cálculo de los elementos unitarios para una única bobina. Fuente: Elaboración propia**

Una vez implementado el modelo completo en MATLAB, se comprueba lo siguiente. Si representamos la temperatura del agua en función de la longitud del intercambiador (sin tener en cuenta los empalmes entre bobinados concéntricos) para flujos a favor, en contra y mixto obtenemos la ilustración 4.10.



**Ilustración 4.10. Temperatura del agua en función de la longitud recorrida en el intercambiador para flujo a favor de corriente y a contracorriente (arriba) y para flujo mixto (abajo). Fuente: Elaboración propia**

$d_e = 7\text{mm}$ ,  $d_i = 5\text{mm}$   $S_T = 14\text{mm}$ ,  $S_L = 14\text{mm}$  Altitud = 1500m  $V'_{ag} = 3\text{L/min}$ ,  
 $T_{inicial,ag} = 15^\circ\text{C}$ ,  $T_{inicial,GPC} = 1000^\circ\text{C}$ ,  $V'_{bio} = 0,00030\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $n = 5$ ,  $m = 5$ ,  $l = 3$

Para tres bobinados concéntricos se comprueba como las curvas de temperatura difieren en función del sentido del agua. En el caso del flujo a favor de corriente, al entrar por la parte inferior del intercambiador, entra en la zona donde la temperatura de los GPC es mayor, por lo que el aumento de temperatura en cada elemento es mayor, mientras que disminuye a medida que asciende. Una vez alcanza la altura máxima en un bobinado pasa de nuevo a un bobinado más interno, también en la parte inferior, y el gradiente vuelve a incrementarse abruptamente (puntos de discontinuidad). Para el flujo a contracorriente la descripción es similar. Al entrar por la parte de arriba donde la temperatura



de los GPC es inferior, la temperatura del agua aumenta lentamente, pero se acelera a medida que va descendiendo a zonas más calientes. En los puntos de discontinuidad vuelve a ascender a zonas frías, con lo que disminuye el gradiente.

La temperatura de salida del intercambiador para la prueba dada es de 39,47°C a favor de corriente y 39,56°C en contra. Como se ve, apenas hay diferencia. Es ligeramente superior para el flujo a contracorriente ya que este tipo de intercambiadores tienen mayor rendimiento al conservar un gradiente más constante entre los fluidos actuantes, sin embargo, al existir una gran diferencia entre las capacidades caloríficas del agua y los GPC, esta disparidad en la efectividad no reviste de mayor relevancia.

Dado que para el flujo mixto se ha establecido que el primer bobinado sea a contracorriente, la primera parte de la curva es exactamente igual a la obtenida para el intercambiador a contracorriente, sin embargo, una vez pasa este bobinado, en vez de ascender, y producirse un cambio brusco en la corriente, sigue en la parte baja del intercambiador al pasar al segundo bobinado, que es a favor de corriente, conservando el gradiente y obteniendo así, unas variaciones de temperatura más suaves.

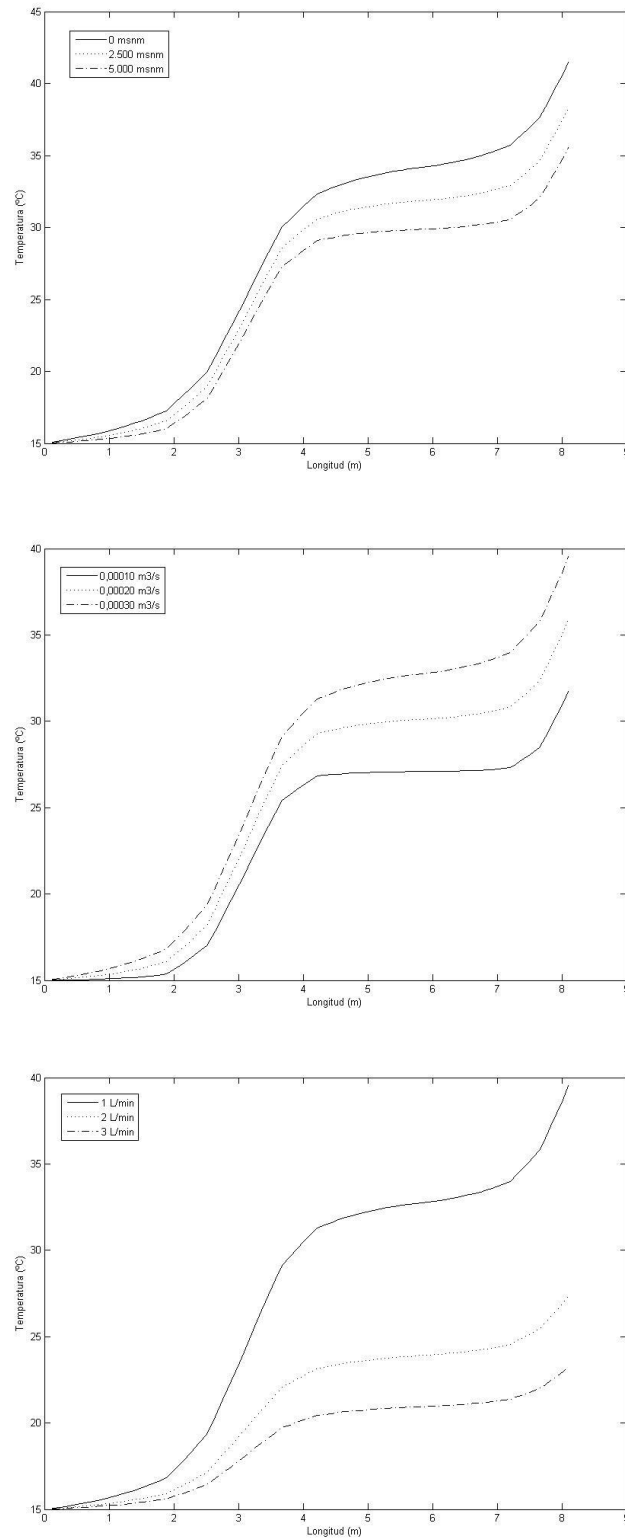
La temperatura a la salida para este caso es de 39,53°C, intermedia entre los otros dos, como era previsible. Pero al utilizar este sistema se ahorra material, ya que no es necesaria una longitud extra de tubo para realizar los empalmes entre bobinados contiguos. Así que dado que el rendimiento es prácticamente el mismo, pero con un menor coste material, se selecciona este último como sistema definitivo.

Existen diferentes variables en el modelo que se pueden modificar alterando así sus resultados. Así la ilustración 4.12, nos muestran como el modelo es muy sensible a la variación del caudal de agua, pero también se ve afectado por el caudal de biogás quemado, o la altitud a la que se realiza el experimento.

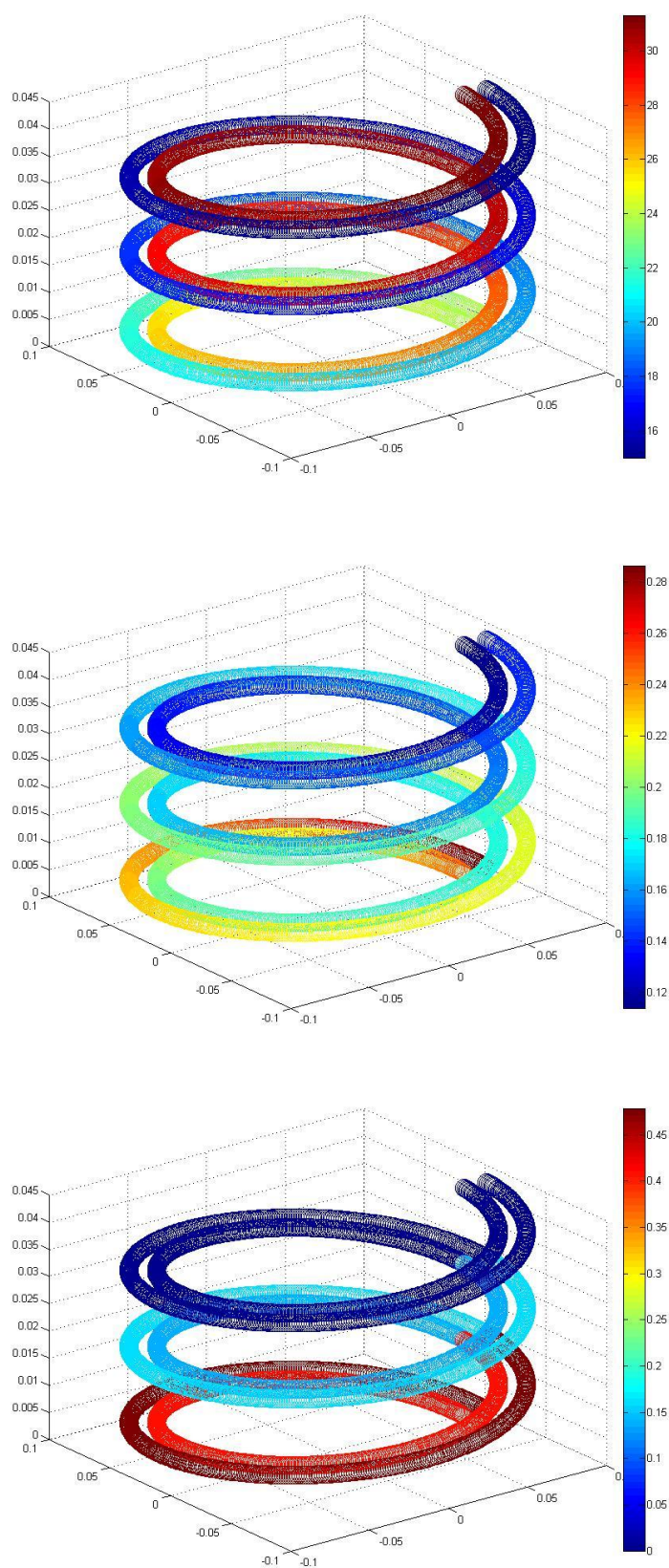
En una representación gráfica en 3D podemos observar la distribución de temperaturas en el intercambiador más claramente (ilustración 4.13, Arriba). Así, como se ha supuesto, la temperatura de entrada, (la más baja) es la del serpentín externo, en la parte superior, ya que entra a contracorriente. A medida que desciende, la temperatura del agua va aumentando, hasta la parte inferior, donde se transfiere al serpentín más interno y comienza a ascender.

En la misma ilustración abajo, aparece la distribución de calores transferidos para cada punto en vatios. La distribución del calor es obvia, y directamente proporcional a la temperatura de los GPC, es decir, desciende con la altura. Para el calor radiante, como se ha propuesto, únicamente es efectivo para las dos primeras espiras, (un 75% y un 25%), las espiras superiores no reciben calor por radiación.

Este modelo nos da una idea básica de cómo funciona el intercambiador y responde a diferentes parámetros, sin embargo se hace necesaria la realización de ciertas pruebas para comprobar y en caso necesario corregir para que sus resultados se adecúen con cierta exactitud a la realidad.



**Ilustración 4.11.** Temperatura del agua en función de la longitud recorrida en el intercambiador variando diferentes parámetros (de arriba abajo: altitud, caudal de agua y caudal de biogás) para las condiciones de ilustración 4.10. Fuente: Elaboración propia



*Ilustración 4.12. De arriba a abajo: temperaturas del agua ( $^{\circ}\text{C}$ ), calor convectivo ( $\text{W}$ ) y calor radiante ( $\text{W}$ ) para cada elemento diferencial. Fuente: Elaboración propia*



## 5. Pruebas

---

Las pruebas experimentales se hacen indispensables cuando se quiere buscar una relación entre los resultados obtenidos teóricamente, y los obtenidos en un escenario real. Así mismo, facilitan el cálculo de ciertos elementos cuyo modelizado depende de tantos factores que requiere de una programación muy avanzada aproximarse a los resultados reales.

Por ello, en este punto se trata en primer lugar de obtener un cabezal eficiente para el quemador del calentador dentro de los rangos de caudal de biogás utilizado. Por otro lado se pretende comprobar la ganancia o empobrecimiento del rendimiento de la combustión en función del tamaño de las lumbreras del inyector (aporte de aire primario). Se comprueba el funcionamiento del conjunto para una carcasa de bajo costo, y, por último se relacionan los resultados para el serpentín helicoidal en la realidad, con los obtenidos con el modelo del intercambiador.

Es importante tener en cuenta que dada la instrumentación utilizada y las condiciones en las que se llevaron a cabo las pruebas existen inexactitudes en los resultados, pero que aún y todo nos permiten sacar conclusiones generales acerca del funcionamiento del sistema en escenarios reales.



## 5.1. Justificación experimental

Tal y como se ha comentado en el capítulo anterior, se hicieron indispensables la realización de una serie de pruebas experimentales para caracterizar algunos de los elementos del calentador. En particular, quedaron abiertos 4 puntos, difícilmente calculables sin una base experimental, y que se hacían imprescindibles para generar un modelo válido del que partir para el diseño:

- Forma del cabezal del quemador. En el punto 4.1.4. se calculan todos los parámetros del quemador excepto el tamaño y geometría del cabezal. En la práctica los GPC debían dirigirse hacia los serpentines del intercambiador, para aprovechar al máximo su calor, por lo que se requería una forma específica del cabezal. Se probaron tres cabezales diferentes en los que se valoró tanto su efectividad en la transmisión de calor para diferentes caudales de biogás como su precio.
- Inyección de aire primario. En este mismo punto también se dispone del cálculo del inyector, en el que resulta las dimensiones necesarias de las lumbreras para introducir la cantidad requerida de aire primario. Se trata de un cálculo simple que puede darnos una idea del proceso, aun y todo se vio necesario comprobar cómo podían afectar estas dimensiones a la combustión de biogás, y en definitiva al rendimiento del calentador
- Caracterización de la carcasa de ladrillo. Dado que la carcasa definitiva del calentador debía cumplir los criterios de asequibilidad propuestos, se hizo necesaria la construcción de una carcasa alternativa de bajo costo para comparar los rendimientos de esta con respecto a la que se realizaban las pruebas.
- Validación del modelo. El modelo completo de transmisión de calor propuesto se completa con los resultados de las experiencias anteriores, sin embargo se hacía necesario un cierto número de pruebas con un serpentín para validar y corregir en caso necesario el modelo con el fin de hacerlo lo más real y fiable posible.

## 5.2. Instalación

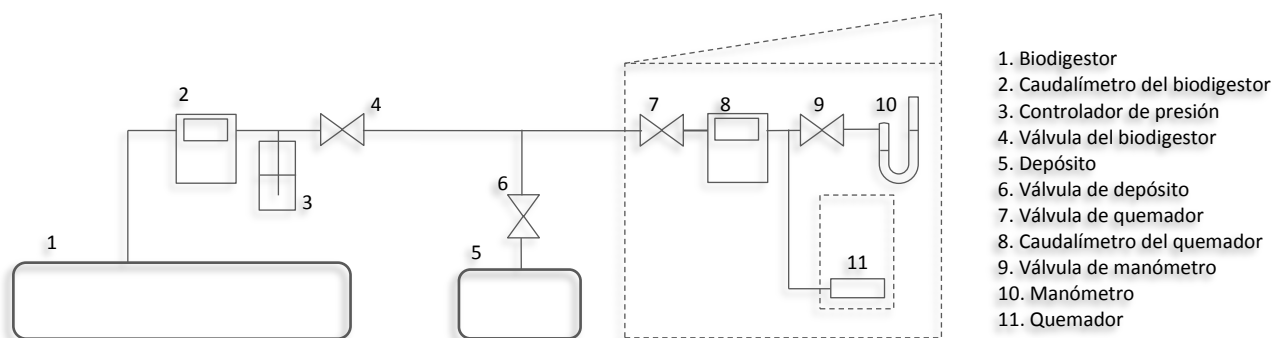
Las pruebas experimentales fueron llevadas a cabo en el Matadero Municipal de Cochabamba, donde se disponía del biogás necesario para su realización. En el matadero se encuentran instalados tres biodigestores de pequeño tamaño en fase experimental con el fin de tratar de los desechos biológicos de la cadena. El propósito de estos biodigestores es el de sanear parte del caudal generado en el matadero como resultado de las actividades llevadas a cabo: limpieza de las heces de los corrales, del agua utilizada para limpiar las vísceras y tejidos grasos, el producto extraído del aparato digestivo de los animales, la sangre etc. De momento al encontrarse en fase experimental solo se trata una fracción de los desechos producidos (1 m<sup>3</sup> al día) que posteriormente es analizada, y el biogás se genera como producto secundario del saneamiento por lo que no tiene una finalidad concreta.



*Ilustración 5.1. Biodigestores experimentales del Matadero Municipal de Cochabamba (izqda.) y caudalímetro con sistema de control de presión (dcha.)*

El biogás generado por estos biodigestores (alrededor de 3000 litros diarios), se medía con un caudalímetro y posteriormente era expulsado directamente a la atmósfera. Estos biodigestores estaban conectados en serie, es decir, el flujo de materia orgánica atravesaba uno detrás de otro, y en cada uno se producía una cierta cantidad de biogás. Lógicamente, en el primer biodigestor existía una mayor proporción de materia orgánica en el flujo, por lo que su producción de biogás era mayor que en los otros dos. Hubo que realizar una serie de modificaciones para poder aprovechar el gas y llevar a cabo las pruebas con un cierto control sobre el caudal de éste.

En la ilustración 5.2 aparece un esquema que muestra el montaje general. Como norma general, la válvula del biodigestor (4) permanecía cerrada. Los procesos biológicos que tenían lugar en el interior del biodigestor (1) generaban biogás, que provocaban el aumento de la presión en su interior y como consecuencia este se hinchaba. El controlador de presión (3) no era más que una botella llena de agua hasta una cierta altura y conectada al biodigestor. Cuando la presión del biogás en el interior del biodigestor era superior a la columna de agua de la botella, el biogás salía atravesando el caudalímetro (2) midiendo así su producción. Este sistema estaba previamente instalado en cada uno de los tres biodigestores.



**Ilustración 5.2. Esquema de instalación para las pruebas experimentales. Fuente: Elaboración propia**

El caudal de gas generado por el biodigestor, en el mejor de los casos, era insuficiente para llevar a cabo las pruebas, por lo que se hizo necesaria la instalación de un reservorio intermedio en el que acumular el gas y de esta forma controlar el caudal sin influir en el proceso normal de producción del biodigestor. A uno de los tres biodigestores (el de mayor producción) se le unió una tubería de plástico que transportaba el gas por un lado al depósito intermedio (5) a través de una válvula (6) y por otro al quemador. Para controlar el paso de gas al quemador se añadió una tercera válvula (7). La presión y el caudal de biogás que llegaban directamente al quemador (11) se medían gracias a un caudalímetro (8) y un barómetro rudimentario (10) implementado por medio de una tubería transparente con una cierta cantidad de agua en su interior.

Para minimizar los efectos climatológicos (radiación solar, viento, etc.) sobre las mediciones se construyó una pequeña caseta que mantenía hasta cierto punto, los aparatos de medida y el calentador resguardados.



**Ilustración 5.3. Instalación montada en el Matadero con el depósito y la caseta (izqda.) y lugar de pruebas (dcha.)**



## 5.3. Instrumentación

Los instrumentos utilizados a lo largo de las pruebas fueron los siguientes:

- Caudalímetro o gasómetro

En la práctica las medidas de caudal no se llevaron a cabo con un caudalímetro como tal, sino que se realizaron con un contador de gas. Los caudalímetros para gases resultan mucho más caros y son menos prácticos para medir caudales durante un largo periodo de tiempo, por lo que a la finalización de las pruebas, este contador de gas pudo utilizarse para medir el caudal de los biodigestores. Para medir el caudal instantáneo, tal y como se mostrará en el apartado 5.5 no había más que restar el volumen medido en dos instantes de tiempo y dividir entre ese periodo. Las especificaciones del contador utilizado aparecen en la tabla 5.1.

Marca	Sintta
Modelo	Gas Meter G2.5 S
Caudal máximo (m <sup>3</sup> /h)	4
Caudal mínimo (m <sup>3</sup> /h)	0,025
Presión máxima de trabajo (mbar)	500
Temperatura de trabajo (°C)	25-35
Sensibilidad (m <sup>3</sup> )	0,001

**Tabla 5.1. Especificaciones del gasómetro utilizado. Fuente: Elaboración propia**

- Válvulas de bola

Para las válvulas de cierre o apertura del gas se utilizaron válvulas metálicas de bola de media pulgada como las que aparecen en la ilustración 5.4. Para la válvula utilizada para el circuito de agua descrito en el punto 5.6.4.1, también se utilizó una válvula de este tipo.

- Tuberías de PVC

Para las conexiones entre los diferentes elementos se usaron tubos de PVC de media pulgada.



**Ilustración 5.4. Gasómetro (izqda.) y válvulas de bola (dcha.)**

- Depósito

El depósito de biogás que se utilizó en la práctica consistía en un globo de plástico resistente a la fricción, termosellado en las costuras, con una capacidad de unos 400 litros y cuyas medidas en vacío aparecen en la ilustración 5.5

- Masas de control

Para controlar el caudal de biogás por el quemador, se ejercía una presión determinada sobre el depósito. Esta presión se generaba, colocando una masa sobre el mismo con un saco con piedras. De esta forma se midieron cuatro masas determinadas que produjeron cuatro niveles de caudal diferentes,  $m_1, m_2, m_3, y m_4$ .

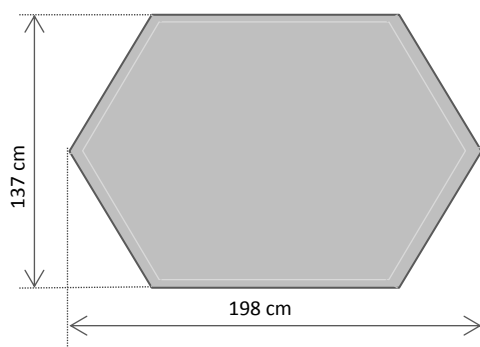
	masa (kg)	caudales (m <sup>3</sup> /s)
m <sub>1</sub>	2	0,00013-0,00017
m <sub>2</sub>	5	0,00017-0,00022
m <sub>3</sub>	10	0,00020-0,00025
m <sub>4</sub>	14	0,00023-0,00027

**Tabla 5.2. Relación entre la masa colocada sobre el depósito y el caudal de biogás producido. Fuente: Elaboración propia**

La presión generada en el depósito no era constante durante toda la prueba, ya que, a medida que el depósito se vaciaba, la misma masa producía una presión más baja y consecuentemente el caudal iba disminuyendo. En el apartado 5.5, se explicará cómo se procedía para obtener medidas válidas.

- Velas

Dada la dificultad para acceder al quemador que se encontraba dentro de la carcasa, para provocar su encendido se utilizaron unas velas con las que se conseguía encender rápidamente a través del propio hueco por el que se introducía el inyector sin correr peligro de quemaduras.



**Ilustración 5.5. Dimensiones del depósito (izqda.) y colocación para pruebas (dcha.)**

- Perola

Se trataba de un recipiente de latón de 0,5 mm de espesor, 194 mm de diámetro y 132 de alto. Servía para medir el calor transferido al llenarla con un litro de agua y medir su temperatura.

- Cronómetro

Los intervalos de tiempo de 10 ó 30 segundos se controlaron gracias a un cronómetro.

- Termómetro

El termómetro utilizado en las pruebas era digital de tipo sonda tal y como se muestra en la Ilustración 5.6. Su precisión era de 0,1°C. Se comprobó que la temperatura medida era la del extremo de la sonda y no la media de toda su longitud.



**Ilustración 5.6. Perola (izqda.) y termómetro digital (dcha.)**

- Manómetro

Tal y como se ha comentado para medir la presión del gas previa al inyector se construyó un manómetro con un tubo de plástico en forma de "U", con una cierta cantidad de agua en su interior. La presión manométrica del gas venía dada por la columna de agua de altura  $a_m$  sin embargo la diferencia de presiones era tan baja que esta altura apenas era perceptible.

- Inyector

El inyector se construyó en base a las dimensiones calculadas en el punto 4 a partir de un tubo de hierro de  $\frac{3}{4}$  de pulgada y 20 cm de longitud, al que se le perforaron cuatro lumbreras de 1 cm de diámetro. A este tubo se le mecanizaron sendas roscas a ambos lados. En uno de los lados se le añadió un empalme de  $\frac{1}{2}$  a  $\frac{3}{4}$  también de hierro al que se le soldó en el centro una placa con un orificio perforado en su centro de 2 mm. La rosca del otro lado serviría para acoplarla al cabezal del quemador. Los planos aparecen en el ANEXO C.

- Cabezal del quemador

Básicamente se analizó el comportamiento de dos tipos de cabezales. El primero de ellos consistía en una caja metálica de base circular soldada en la que se perforaron agujeros en la parte superior para distintos radios y cuyas especificaciones aparecen en el ANEXO C.7. Este quemador fue construido específicamente para el calentador por lo que su precio era bastante elevado.

El segundo de ellos era simplemente un soplete en el que se hacía salir los gases en dirección vertical por medio de un codillo y se redireccionaban haciéndolos pasar a través de un plato cerámico sostenido por un soporte. Se probó este tipo de quemador para dos tamaños de salida del codillo: de  $\frac{1}{2}$  y 1 pulgada ( $QS_{1/2}$  y  $QS_1$ ). Los planos de estos últimos cabezales no son necesarios ya que estaban conformados por piezas normalizadas<sup>28</sup>:

- $QS_{1/2}$ : Manguito hembra mtl.  $\frac{3}{4}$ " -  $\frac{1}{2}$ ", Machón mtl.  $\frac{1}{2}$ " -  $\frac{1}{2}$ " y Codo 90° mtl.  $\frac{1}{2}$ " -  $\frac{1}{2}$ "
- $QS_1$ : Manguito hembra mtl.  $\frac{3}{4}$ " - 1", Machón mtl. 1" - 1" y Codo 90° mtl. 1" - 1"

El cabezal circular no se utilizó finalmente para ninguna prueba tras comprobar que la llama ardía de forma muy irregular, llegando a apagarse en muchos casos. Se pensó en su momento, que quizás el número de agujeros era excesivo para el caudal de biogás con el que se estaba trabajando, por lo que se procedió a taparse una parte con masilla. Aún y todo tras unas mediciones previas se comprobó cómo su rendimiento estaba muy por debajo del otro a pesar de su mayor coste por lo que se tomó la decisión de no continuar utilizándolo.



**Ilustración 5.7. Inyector con cabezal de tipo soplete (izqda.) y cabezal circular (dcha.). NOTA: al inyector no se le han mecanizado las lumbreras**

- Carcasa

Para las diferentes pruebas se utilizaron dos carcassas distintas para dos fines distintos. Una primera carcasa en forma cilíndrica más cómoda de utilizar destinada principalmente a medir el rendimiento de los cabezales, y otra de base rectangular de ladrillo, cuyo cometido era el de simular la carcasa del calentador real para calcular las pérdidas en comparación con la otra carcasa. Las especificaciones de la carcasa de metal aparecen en el

<sup>28</sup> Los planos para el soporte del plato de este cabezal sí que aparecen en el ANEXO C.8

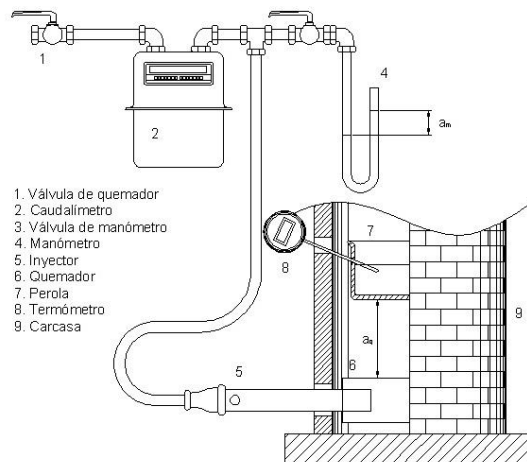
ANEXO C.6. Para la carcasa de ladrillo se conformo con ladrillos de arcilla de 10,5x23x5,5 cm, una cámara de base cuadrada y 24 cm de lado, y una altura total de 69 cm.



**Ilustración 5.8.** Carcasa metálica cilíndrica (izqda.), quemador en el interior de carcasa cilíndrica (centro) y carcasa de ladrillo (dcha.)

## 5.4. Procedimiento general

Salvo para el último experimento, en el que se utilizaba un serpentín para simular el modelo, y cuyo procedimiento se tratará en su apartado particular, para el resto de experiencias se siguieron los mismos pasos. A fin de cuentas, en todos ellos la finalidad era la de medir una transferencia de calor variando diferentes parámetros y manteniendo el resto inalterados.



**Ilustración 5.9.** Esquema del montaje para la realización de las pruebas. Fuente: Elaboración propia

Esta transferencia de calor se medía por medio del calentamiento de un volumen de agua durante un periodo determinado de tiempo, tomando en cada instante valores para el caudal de biogás y la temperatura del agua. Los parámetros a variar fueron: el cabezal del quemador y caudal de biogás (Experimento I), la entrada de aire primario (Experimento II), el caudal de biogás y la carcasa (Experimento III). En la ilustración 5.9, aparece un esquema de la colocación de todos los elementos que se utilizaban en la prueba. El proceso era el siguiente:

- Para llenar el reservorio de biogás se abrían las válvulas del biodigestor y del depósito mientras que la válvula que controlaba el paso al quemador se mantenía cerrada.
- El depósito se consideraba lleno cuando el controlador de presión del biodigestor comenzaba a burbujear (escapaba el biogás), lo cual indicaba que tanto el biodigestor como el depósito se encontraban a la misma presión: La que venía dada por la columna de agua del controlador.

- Mientras el depósito de biogás se llenaba, se colocaba la perola con su volumen de agua a la altura del quemador  $a_q$  (unos 100 mm), deseada para la prueba y se introducía el termómetro. Entre las pruebas, el termómetro estaba colocado en las inmediaciones del calentador, de forma que antes de meterlo en el agua se tomaba el dato de la temperatura ambiente.
- Una vez el depósito estaba lleno, se cerraba la válvula del biodigestor, y se colocaba encima del depósito una masa concreta para conseguir el caudal de biogás requerido.
- En esta situación se abre la válvula del calentador. Normalmente, salvo para pruebas concretas, la válvula del manómetro permanecía cerrada.
- Acto seguido de abrir la válvula se encendía el quemador por medio de una vela. En el instante en el que comenzaba a arder el biogás se ponía en marcha el cronómetro y se tomaban los datos del volumen de biogás y de la temperatura inicial.
- Los datos se iban tomando por intervalos de 30 segundos, y los periodos oscilaban entre los 5 y los 10 minutos. Si la temperatura del agua aumentaba por encima de los 80°C se detenía también la prueba, ya que comenzaba a formarse vapor y entonces intervenía el calor latente, el cual no se podía medir. Hay que tener en cuenta que dado que Cochabamba se encuentra a 2500 msnm, la temperatura de ebullición del agua disminuye considerablemente.
- Una vez finalizada la toma de datos para la prueba dada, se cerraba la válvula del quemador y se abría la del biodigestor para que el depósito comenzara a llenarse cuanto antes.
- Finalmente se retiraba el termómetro de la perola y se desechaba el agua calentada para volver a rellenar la perola con agua fría.

Eventualmente también se medía la temperatura a la que salía el biogás del reservorio. Esta medición se llevaba a cabo colocando la masa encima del depósito y abriendo la válvula del quemador. El termómetro se introducía por una de las lumbreras del inyector y se esperaba unos segundos. De la misma manera se procedía para medir la presión, sin embargo la presión en el interior del depósito era similar a la atmosférica, con lo que la altura de la columna de agua  $a_m$ , como se ha comentado, no podía ser medida con exactitud.

## 5.5. Análisis de los resultados

El objetivo general en todos y cada uno de los experimentos era el mismo: medir el calor transferido para una serie de parámetros dados, frente a un calor generado por la combustión de una determinada cantidad de biogás. El calor transferido se relacionaba con el calentamiento de la masa de agua, cuya temperatura se medía continuamente a lo largo de la experiencia, mientras que el calor generado, estaba relacionado con el caudal de biogás. Por tanto en cada prueba se tomaron datos tres variables distintas: la temperatura del agua, el caudal, y el tiempo.

Tras la observación de los datos obtenidos en varias pruebas se comprobó la existencia de dos irregularidades que dificultaban el análisis de estas variables:

- Imposibilidad de mantener un caudal constante.
- Carácter no lineal de la temperatura.

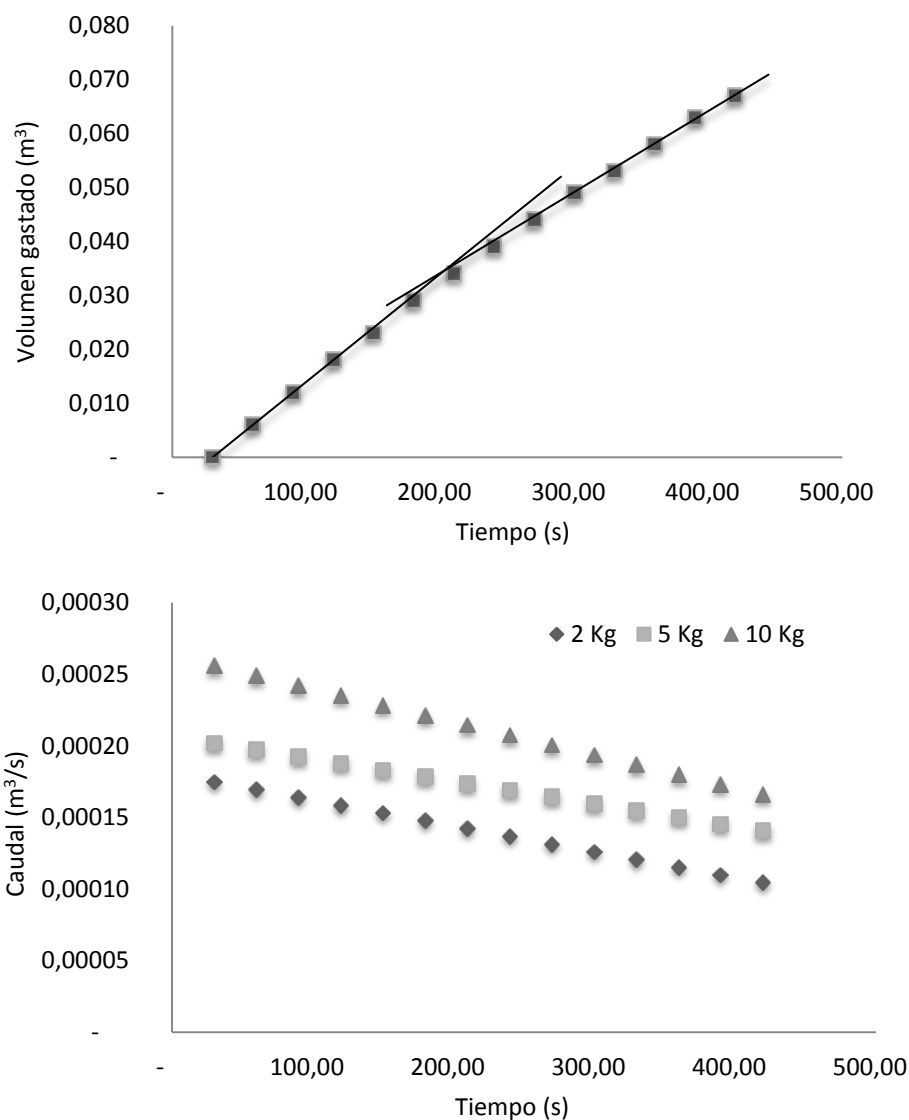
El primero de los casos es consecuencia directa del proceso normal del vaciado de un depósito de estas características. Cuando un depósito de gas, cuya presión inicial en su interior es superior a la presión atmosférica, se abre, el gas fluirá del reservorio de mayor presión (el interior del depósito), al de menor presión (la atmósfera), y en el proceso, el depósito ira perdiendo presión hasta igualar la presión atmosférica, momento en el cual ya no saldrá más gas. Es un proceso similar al pinchado de la rueda de un coche. La presión del gas del neumático soporta parte del peso del coche, si este se pincha (se abre a la atmósfera), el aire saldrá al exterior, perdiendo presión y la masa del coche ira venciendo hasta vaciarlo casi por completo.

El hecho que nos interesa es que a medida que el depósito pierde gas, la presión en su interior irá disminuyendo y al existir una menor diferencia de presiones entre el interior y el exterior, la velocidad de salida del gas irá disminuyendo.



Tal y como se ha explicado anteriormente el biogás se retenía en un reservorio intermedio y el caudal era controlado mediante la colocación de determinadas masas sobre éste. El volumen que se media en las pruebas seguía una relación similar a la mostrada en la Ilustración 5.10 (arriba), en la cual se puede apreciar como la recta ajustada en los tres primeros datos es significativamente mayor a la ajustada a los tres últimos valores de la prueba. Esto significa, que al principio de la prueba para una masa dada, se gastaba mayor volumen de biogás, ya que la presión en su interior era mayor, mientras que al final, el volumen disminuía.

La derivación de la curva ajustada al volumen consumido (cuadrática), resultaba en las curvas para el caudal (lineales) como las que se muestran en la ilustración 5.10 para diferentes masas sobre el depósito.

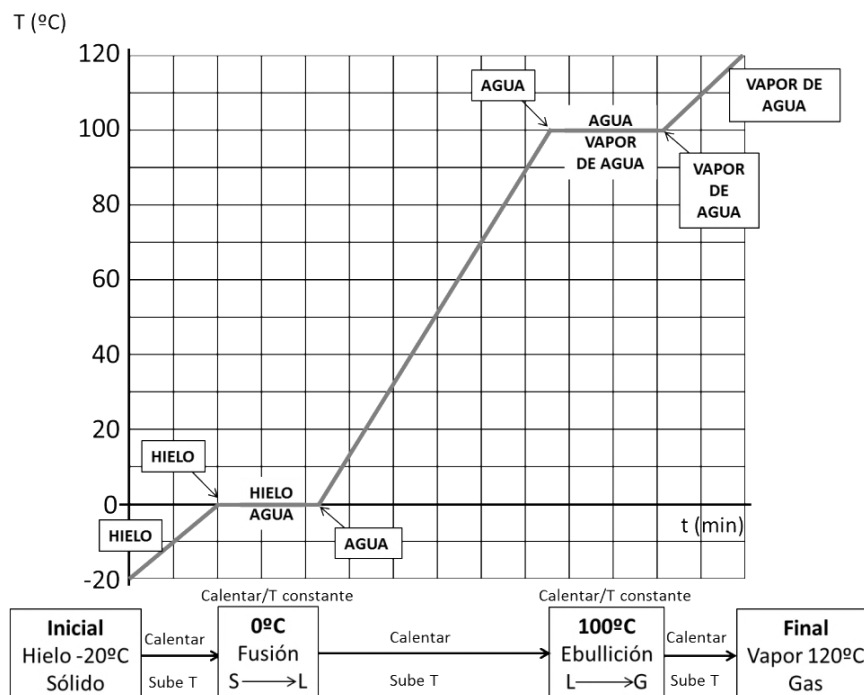


**Ilustración 5.10.** Volumen de biogás consumido a lo largo de una prueba con el tiempo (arriba) y caudal instantáneo para tres pruebas diferentes con tres masas de control distintas (abajo). Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, el caudal iba disminuyendo durante el transcurso de la prueba, de ahí la existencia de un caudal variable en todo momento. Este hecho se reflejaría inevitablemente en que el calor generado y transmitido a la perla no podría considerarse constante con el tiempo.

Por otro lado se observó al representar los datos obtenidos de la temperatura frente al tiempo que no existía una relación lineal entre ambos como debería suceder para el caso ideal. Tal y como se observa en la recta teórica de la ilustración 5.11, al someter a una masa de agua a un calor constante, esta pasa por diferentes etapas: cuando la masa de agua cambia de estado, éste se produce a tem-

peratura constante, y en el proceso absorbe un calor latente de fusión o vaporización. Durante las etapas en las que no hay cambio de estado, la temperatura del agua aumenta de forma lineal, siempre y cuando el calor aportado sea constante.



**Ilustración 5.11. Perfil de temperaturas teórico del calentamiento de una masa de agua a sometida a un aporte de energía constante.**

Sin embargo en nuestra experiencia cabe destacar varios factores que afectaban al calentamiento del agua y la alejaban de la curva ideal:

- Dada la altitud a la que se llevaron a cabo las pruebas (2500 msnm), la temperatura de ebullición del agua es inferior a los 100°C. La temperatura real en grados Celsius viene dada por la siguiente fórmula empírica:

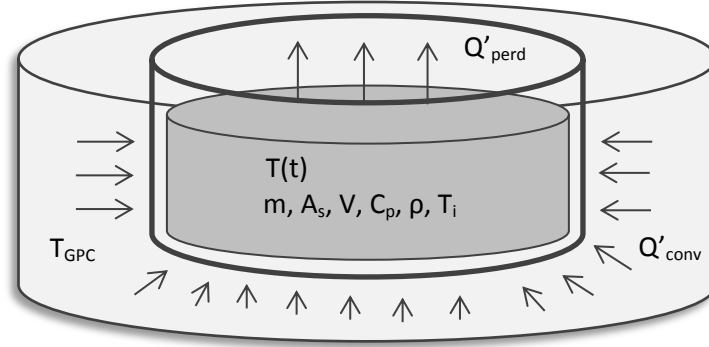
$$T_b = \left( 100 - \frac{\text{Altitud}}{300} \right) \quad (5.1)$$

Sustituyendo la altitud indicada en la relación se obtiene una temperatura de ebullición de 91°C.

- Por la razón explicada anteriormente, no se disponía de una fuente de calor constante en el tiempo. Dadas las características de la instalación no era posible conseguir un caudal constante de biogás en el quemador, por lo que el calor generado variaría de forma proporcional al caudal de biogás, y variaría a lo largo de toda la prueba. Al principio dado que el volumen de biogás quemado era mayor, también lo sería el calor generado, pero éste iría disminuyendo con el tiempo.
- El mecanismo por el cual tiene lugar la transferencia de calor al agua es la convección. Este mecanismo entre un fluido en movimiento (GPC) y un sólido (perola) es proporcional a la diferencia de temperatura entre ambos medios. Al transferirse calor a la perola (y de ella al agua) aumenta su temperatura, por lo que la diferencia de temperatura existente entre la perola y los GPC disminuye, disminuyendo consecuentemente el calor transferido a medida que aumenta la temperatura del agua.
- Por la ley de enfriamiento de Newton la razón de pérdida de calor de un cuerpo es proporcional a la diferencia entre la temperatura del cuerpo y la del medio que lo circunda. Por tanto ha de tenerse en cuenta que cuanto mayor sea la temperatura de un cuerpo respecto al medio externo, mayores serán las pérdidas de calor. Esto se traduce en nuestra experiencia en que a medida que aumenta la temperatura de la perola, más calor pierde al exterior.

Sin embargo se comprueba que el mecanismo de transmisión de calor no afecta en gran medida a la curvatura de las temperaturas, y que las pérdidas, sólo tienen lugar cuando el medio exterior está a una temperatura inferior a la del cuerpo. En el caso de la perola, ésta se encuentra rodeada por los GPC, siempre a una temperatura mayor.

Para comprender el proceso de transmisión de calor vamos a simplificar el problema suponiendo que la masa de agua se comporta como un sistema concentrado. Esto implica que la temperatura en su interior permanece uniforme en todo momento durante el proceso de transmisión de calor. La temperatura en este caso se toma como función únicamente del tiempo.



**Ilustración 5.12. Esquema simplificado del problema de transmisión de calor a la perola. Fuente: Elaboración propia**

Se considera así tal y como se muestra en la ilustración 5.12, una masa  $m$  de agua de densidad  $\rho$  y calor específico  $C_p$ , que ocupa un volumen  $V$  y expone una superficie a la convección  $A_s$ . En el instante  $t = 0$ , la masa a la temperatura  $T_i$  se coloca en un medio a la temperatura  $T_{GPC}$  y se lleva a efecto la transferencia de calor entre el agua y su medio, con un coeficiente de transferencia de calor  $h$ . Se supondrá que el análisis de sistemas concentrados es aplicable, de modo que la temperatura permanece uniforme dentro del cuerpo en todo momento y sólo cambia con el tiempo,  $T = T(t)$ .

Durante un intervalo diferencial de tiempo,  $dt$ , la temperatura del cuerpo se eleva en una cantidad diferencial  $dT$ . Un balance de energía del sólido para el intervalo de tiempo  $dt$ , siempre y cuando no se consideren las pérdidas, es decir, el intercambio de calor por la parte superior del agua, se puede expresar como:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Transferencia de calor} \\ \text{hacia el cuerpo en } dt \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Incremento de la temperatura} \\ \text{del cuerpo durante } dT \end{array} \right)$$

$$hA_s(T_{GPC} - T)dt = mC_p dT \quad (5.2)$$

Dado que  $m = \rho V$  y  $dT = d(T - T_{GPC})$ , puesto que  $T_{GPC} = \text{constante}$ , la ecuación anterior se puede reacomodar como:

$$\frac{d(T - T_{GPC})}{T - T_{GPC}} = -\frac{hA_s}{\rho VC_p} dt \quad (5.3)$$

Al integrar entre  $t = 0$ , en que  $T = T_i$  hasta cualquier instante en que  $t$ , en el cual  $T = T(t)$ , da:

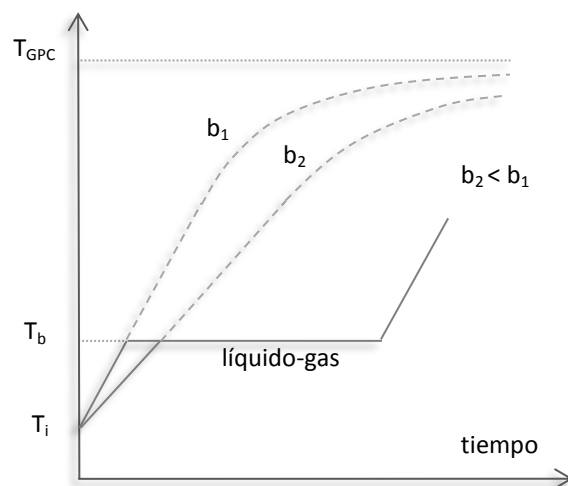
$$\frac{\ln(T(t) - T_{GPC})}{T_i - T_{GPC}} = -\frac{hA_s}{\rho VC_p} t \quad (5.4)$$

Al tomar la exponencial de ambos miembros y reordenarla se queda como:

$$T(t) = T_{GPC} + (T_i - T_{GPC})e^{-bt} \quad b = \frac{hA_s}{\rho VC_p} \quad (5.5)$$

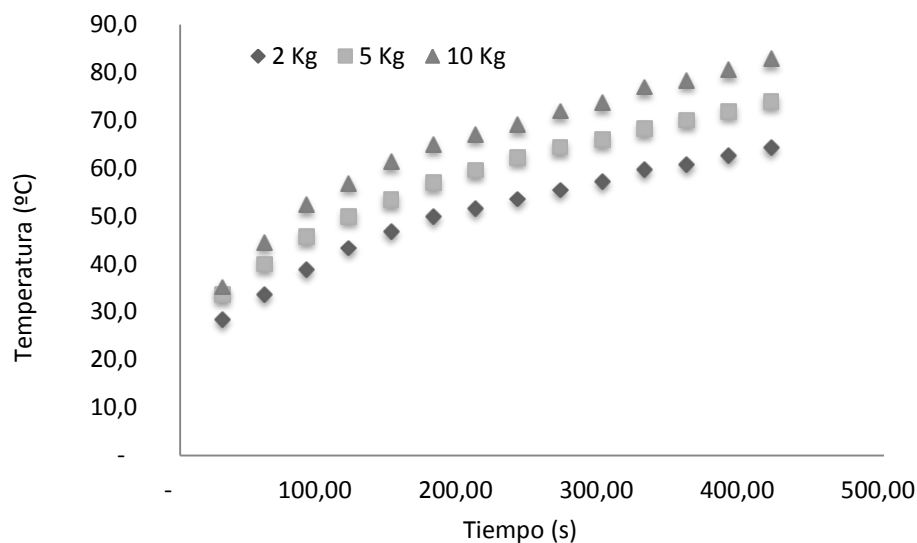
$\frac{1}{b}$  (s), es la conocida como constante de tiempo. Si representamos la temperatura de la masa de agua en el tiempo para este caso se obtienen la ilustración 5.13.





**Ilustración 5.13.** Curva de calentamiento de un sistema concentrado (discontinua) y comparación con la curva de calentamiento del agua (continua). Fuente: Elaboración propia

La curva de la temperatura en el caso de que el punto de fusión del agua fuera superior a  $T_{GPC}$ , sería la indicada por la línea intermitente. Sin embargo la temperatura de los gases (700-1000°C) es muy superior a la temperatura de fusión  $T_b$  (90°C), por lo que la curva real seguida por el agua estaría marcada por las líneas continuas. Se comprueba por tanto, que a pesar de que el calor es aportado a través de un mecanismo de convección, la diferencia de temperaturas entre el agua y los gases es tan grande para el intervalo en el que se trabaja (entre 20 y 80°C), que la curvatura producida por este fenómeno no influye de manera determinante. En otras palabras, para una temperatura de los gases y un coeficiente de convección constantes, la temperatura debería seguir una relación lineal con el tiempo siempre y cuando se trabaje por debajo del punto de fusión del agua.



**Ilustración 5.14.** Curvas de temperatura obtenidas en las pruebas mostradas en la Ilustración 5.10. Fuente: Elaboración propia

Se considera por tanto, que la curvatura en los datos de temperatura obtenidos es debida principalmente a la variación en el caudal de biogás quemado. Al principio de cada prueba, el caudal de biogás quemado es mayor, lo que genera una mayor cantidad de calor, por lo que la temperatura del agua aumenta más rápidamente. A medida que avanza la prueba el calor generado disminuye como consecuencia de la quema de una menor cantidad de biogás, por lo que la temperatura sigue aumentando, pero más lentamente.

Para el análisis de los datos se hizo necesario el establecer un periodo en el que se tomase un caudal de biogás medio constante con el fin de comparar cada uno de los experimentos. Los datos

experimentales y resultados de todas las pruebas aparecen en el ANEXO C y se procedió de la siguiente manera:

- Se parte de los datos experimentales de tiempo  $t$ , temperatura  $T$  y volumen de biogás consumido  $V$ .
- Se estandariza el volumen de biogás consumido  $V_{estd}$ , ya que los valores obtenidos directamente son los indicados por el contador de gas. De esta forma obtenemos el volumen de biogás consumido en dicha prueba a partir de los 30 primeros segundos.
- Se representan la temperatura y el volumen de biogás estandarizado frente al tiempo en una misma gráfica.
- Se aproximan los valores de la temperatura para cada instante de tiempo mediante una regresión potencial. Esta tipo de curva es el que mejor se aproximaba a los datos reales para el intervalo de interés. La curva es de la forma:

$$T = C \cdot t^n \quad (5.6)$$

Así se obtienen los valores de  $C$  y  $n$ , para cada prueba.

- A partir de estos valores se obtiene la curva para la derivada de la temperatura con el tiempo, necesaria para el cálculo del calor absorbido por la masa de agua:

$$T' = \frac{dT}{dt} = nC \cdot t^{n-1} \quad (5.7)$$

- Por otro lado se aproximan los valores del volumen estandarizado  $V_{estd}$ , por medio de una regresión cuadrática. La curva representaba bien el fenómeno antes comentado en el que el volumen consumido al principio de la prueba era mayor al consumido al final de la prueba.

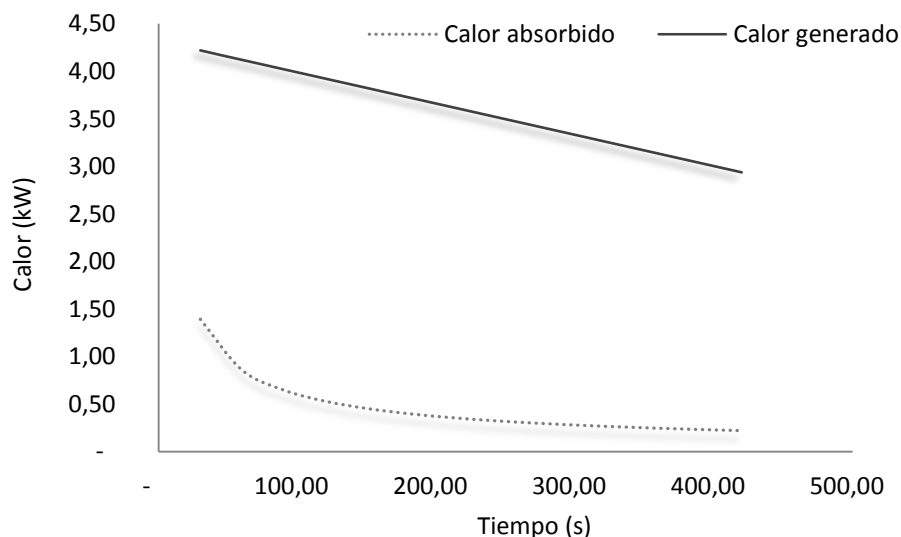
$$V = at^2 + bt + c \quad (5.8)$$

Se obtenían de esta forma los valores de  $a$ ,  $b$  y  $c$ .

- La derivación de esta ecuación conduce a la curva del caudal con el tiempo:

$$V' = 2at + b \quad (5.9)$$

La cual es lineal con pendiente negativa. Obsérvese que de haber aproximado los datos del volumen por una regresión lineal, a lo que se podría asemejar a primera vista, conduciría la obtención de un caudal constante, lo cual no representaría en absoluto el proceso llevado a cabo.



**Ilustración 5.15. Calores generados y absorbidos para una prueba aleatoria. Fuente: Elaboración propia**

- A partir de estas relaciones se puede obtener el calor generado por la combustión de un determinado caudal de biogás, así como el calor absorbido por la masa del agua:

$$Q'_0 = \rho_{bio} PCI_{bio} V' \quad (5.10)$$

$$Q'_i = m_{ag} C_{p,ag} T' \quad (5.11)$$

Donde  $\rho_{bio}$  ( $\text{kg/m}^3$ ), es la densidad del biogás para la altitud a la que se realizan las pruebas,  $PCI_{bio}$  ( $\text{kJ/kg}$ ), es el poder calorífico inferior del biogás con un 55% de metano,  $m_{ag}$ , la masa de agua presente en la perola y  $C_{p,ag}$ , el calor específico del agua a temperatura ambiente.

- Dado que los calores generado y absorbido, son proporcionales a  $V'$  y  $T'$ , sus gráficas serán semejantes, tal y como se muestra en la ilustración 5.15.
- Para valorar un intervalo concreto en el que se considere un caudal de biogás constante se toma el periodo de tiempo determinado por las temperaturas de 40 y 60°C. Se elige este periodo por evitar en cierta medida los transitorios iniciales y por estar presente en todas las pruebas (en algunas se superan los 80°C y otras apenas llega a los 70°C). Además es la zona en la que más o menos la temperatura aumenta linealmente.
- Para determinar los dos instantes de tiempo en los que la temperatura toma los valores de 40°C y 60°C,  $t_{40}$  y  $t_{60}$ , se sustituye en la ecuación. 5.6 estas temperaturas y se despeja la variable tiempo. El intervalo de tiempo  $\Delta t_{40-60}$  quedará determinado por la resta de ambos.
- El volumen de biogás consumido, el calor total generado y el calor total absorbido durante este periodo se obtienen por integración de las curvas anteriormente calculadas entre estos dos instantes de tiempo:

$$V_{40-60} = \int_{t_{40}}^{t_{60}} V' dt \quad (\text{m}^3) \quad (5.12)$$

$$Q_{0,40-60} = \int_{t_{40}}^{t_{60}} Q'_0 dt \quad (\text{KJ}) \quad (5.13)$$

$$Q_{i,40-60} = \int_{t_{40}}^{t_{60}} Q'_i dt \quad (\text{KJ}) \quad (5.14)$$

- Los valores medios para este periodo de caudal  $V'_{40-60}$ , calor instantáneo generado  $Q'_{0,40-60}$  y calor instantáneo absorbido  $Q'_{i,40-60}$  se obtienen dividiendo por el periodo de tiempo:

$$V'_{40-60} = \frac{V_{40-60}}{\Delta t_{40-60}} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \quad (5.15)$$

$$Q'_{0,40-60} = \frac{Q_{0,40-60}}{\Delta t_{40-60}} \quad (\text{kW}) \quad (5.16)$$

$$Q'_{i,40-60} = \frac{Q_{i,40-60}}{\Delta t_{40-60}} \quad (\text{kW}) \quad (5.17)$$

- El rendimiento de la transmisión de calor se calcula:

$$\eta = \frac{Q_{i,40-60}}{Q_{0,40-60}} \quad (5.18)$$

- El tratamiento de los resultados de cada experimento se aborda en el apartado 5.6 de forma particular. En las tres primeras experiencias la finalidad es la de comparar los rendimientos de transmisión de calor para distintos cabezales, caudales de aire primario y carcasa. En la última prueba el procedimiento de análisis difiere ligeramente

## 5.6. Resultados y conclusiones

### 5.6.1. Experimento I. Cabezal del quemador

El objetivo de esta prueba es el de comprobar el rendimiento de cada uno de los quemadores propuestos para distintos caudales de biogás con el fin de seleccionar el más apropiado para la realización del resto de pruebas, la generación del modelo, y finalmente, para el calentador diseñado.

En la tabla 5.3 se muestra un resumen de las pruebas llevadas a cabo para este experimento.

Fechas de realización		
23/01/2013-26/01/2013		
Parámetros fijos		
Carcasa	Metal	
a <sub>q</sub> (cm)	10	
Aire Primario	100%	
Parámetros variables		
	Tipo	Total
Masa de control	m <sub>1</sub> , m <sub>2</sub> , m <sub>3</sub> , m <sub>4</sub>	4
Quemador	QS <sub>1/2</sub> , QS <sub>1</sub>	2
3 Pruebas por combinación		
Total pruebas		24

**Tabla 5.3. Resumen experimento I (Cabezales del quemador). Fuente: Elaboración propia**

De los datos experimentales para cada una de las pruebas y su posterior análisis, los cuales aparecen en el ANEXO C, se obtienen las siguientes gráficas (ilustraciones 5.16 y 5.17), las cuales nos muestran el calor medio absorbido por el agua entre los 40 y los 60°C, así como el rendimiento, en función del caudal utilizado.

De la observación de la gráfica del calor absorbido podemos sacar tres conclusiones genéricas:

- En primer lugar, que los puntos siguen una tendencia lineal ascendente con el caudal de biogás quemado. Esto es lógico ya que a mayor cantidad de biogás quemado, mayor será el calor generado, y por tanto mayor el absorbido por la perola. Sin embargo, cabe pensar en que llegará un momento en el cual esta tendencia ascendente se ralentice debido a la incapacidad del cabezal para quemar todo el biogás suministrado.
- Por otro lado, se comprueba como el calor absorbido por la perola es mayor, dentro de todo el rango de caudal utilizado, en el caso del quemador de media pulgada. Esto puede ser debido a que, dado que el diámetro del de media pulgada es inferior, para un mismo caudal de biogás, éste sale a mayor velocidad, mejorando de esta forma el coeficiente de convección al atravesar la perola y con ello la transmisión de calor.
- Y finalmente se puede observar como a pesar de que las masas utilizadas sobre el depósito de biogás fueron las mismas para ambos cabezales, se obtuvieron caudales bastante mayores para el caso del quemador de una pulgada que para el de media. Esto nos indica que existe una relación entre el caudal consumido de biogás y el diámetro del cabezal para una misma presión en el depósito.

Analizando la gráfica del rendimiento vemos como el rendimiento del quemador de media pulgada es superior para cualquier caudal (entre los 0,00015 y los 0,0003 m<sup>3</sup>/s) al quemador de una pulgada. Se ha querido aproximar los puntos por una regresión cuadrática para observar el fenómeno antes descrito, en el cual llega un momento en que no se puede quemar todo el biogás que se suministra al quemador. En el máximo se sitúa el caudal para el que se quema la máxima cantidad de biogás, si se utilizan caudales mayores, se seguirá quemando la misma cantidad, pero consumiremos otro tanto que no arderá. Por la observación de ambas curvas se quiere pensar que al ir aumentando el diámetro del cabezal, este máximo se va desplazando hacia abajo y a la derecha, y viceversa. Es decir, para mayores caudales conviene utilizar un diámetro de quemador mayor, y para menores, de diámetro más pequeño. No obstante esto es una interpretación de los datos obtenidos y a falta de más experiencias no se puede asegurar que esto fuera a ser exactamente así, por lo que cabe esperar otras explicaciones.

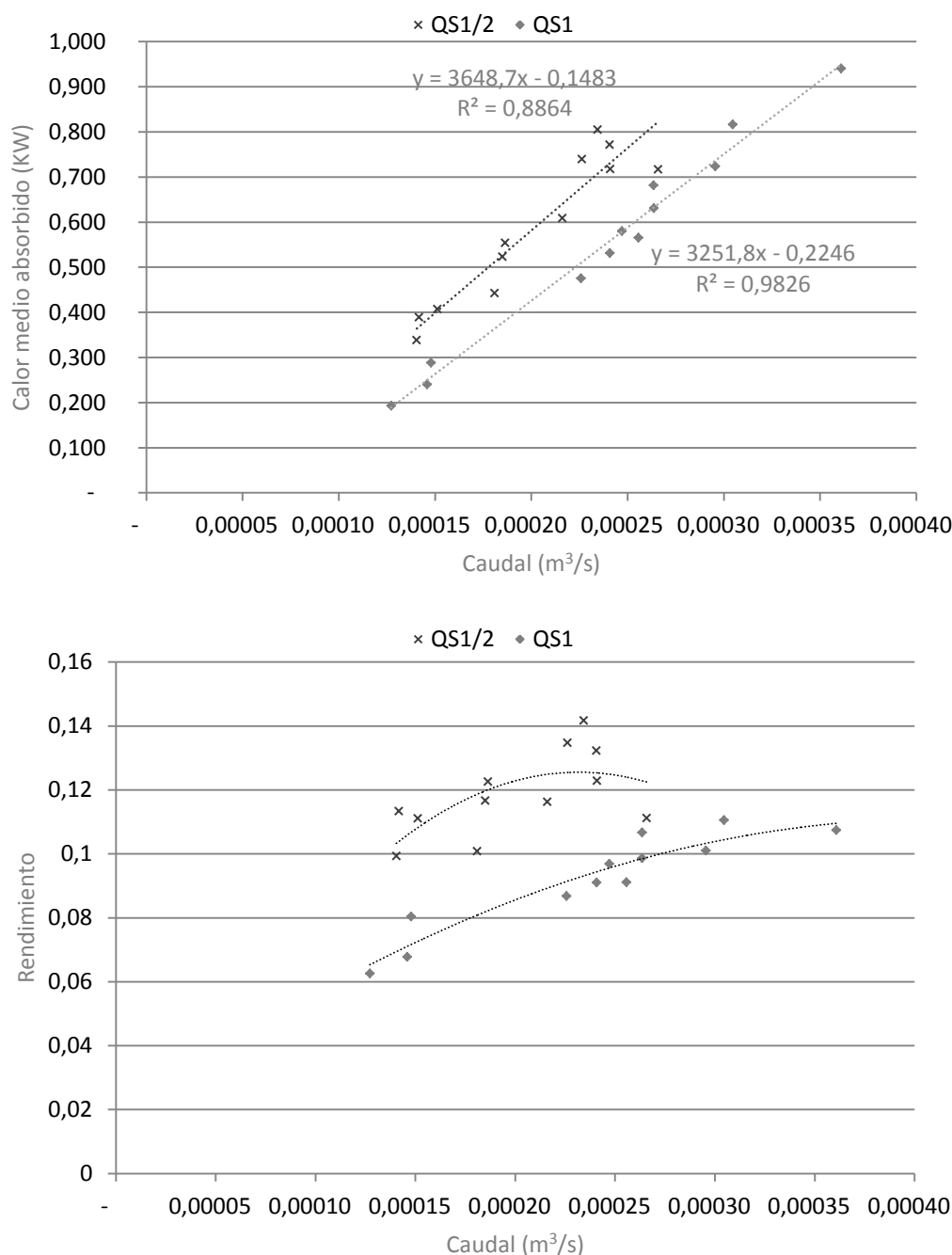
Con todo ello, se obtiene una conclusión clara, y es que para el rango de caudales con el que se va a trabajar en el resto de experiencias, el quemador de media pulgada es más eficiente que el de una, por lo que este último se desecha y se pasa a realizar el resto de experiencias únicamente con el primero de ellos. En cualquier caso, a la hora de buscar un cabezal para el quemador en la construcción del calentador, su tamaño dependerá del caudal de biogás a utilizar, y a la vista de los datos, se establecerá la siguiente norma, teniendo en cuenta los tamaños de tubo normalizados:

- Para caudales de biogás menores de 0,00025 m<sup>3</sup>/s, se utilizará el cabezal de 1/2'.

- Para caudales comprendidos entre 0,00025 y 0,00035 m<sup>3</sup>/s se utilizará el cabezal de ¾'.
- Para caudales de biogás entre 0,00035 y 0,00045 m<sup>3</sup>/s se utilizará el cabezal de 1'.

Esto se establece así porque, a pesar de que el cabezal de media pulgada nos dé un mayor rendimiento, parece complicado suministrar caudales mayores, a pesar de aumentar la presión sobre el depósito. A la vista está que los caudales suministrados para las masas  $m_4$  (14kg) y  $m_3$  (10kg), son bastante similares a pesar de que ejercen distinta presión. Así pues se incluye el cabezal de ¾' que se supone tendrá un comportamiento intermedio entre los dos probados.

Los resultados de esta prueba se introducen en el modelo del quemador, para obtener el diámetro del cabezal en función del caudal de biogás



**Ilustración 5.16. Resultados de experimento I (Cabezales del quemador), calor absorbido (arriba) y rendimiento (abajo) frente al caudal de biogás. Fuente: Elaboración propia**

### 5.6.2. Experimento II. Aire primario

El objetivo de este experimento es el de comprobar cómo se comporta la combustión variando la cantidad de aire primario introducida en el caudal de biogás. Esto se realiza tapando parcial o totalmente las lumbreras del inyector tal y como se muestra en la ilustración 5.17 y analizando el rendimiento para las mismas condiciones. Con ello se pretende calcular el diámetro óptimo para las lumbreras del inyector.



*Ilustración 5.17. Aire primario al 50% (izqda.) y aire primario al 0% (dcha.)*

En la tabla 5.4 se muestra un resumen de las pruebas llevadas a cabo para este experimento.

Fechas de realización		
28/01/2013-29/01/2013		
Parámetros fijos		
Carcasa	Metal	
a <sub>q</sub> (cm)	10	
Masa de control	m <sub>1</sub>	
Quemador	QS <sub>1/2</sub>	
Parámetros variables		
	Tipo	Total
Aire Primario	0%, 50%, 100%	3
3	Pruebas por combinación	
Total pruebas		9

**Tabla 5.4. Resumen experimento II (Aire primario). Fuente: Elaboración propia**

Para el análisis de los datos de este experimento se procedió de manera ligeramente diferente al explicado en el apartado 5.5.

Al elegir, tal y como se indicaba, un intervalo de tiempo definido por las temperaturas de 40 y 60°C, y el caudal seguir una curva diferente en cada prueba, hacía que en dicho intervalo, aun utilizando una masa de control idéntica se gastasen distintos volúmenes de biogás, y, consecuentemente obtuviéramos unos caudales medios diferentes. En ciertas pruebas en las que la variable era el caudal de biogás (masas de control) no importaba en gran medida ya que así obteníamos puntos para un mayor número de caudales.

Sin embargo, cuando el parámetro variable era diferente al caudal, se necesitaba trabajar con caudales iguales, para comparar los puntos en función de una variable diferente, en este caso, el aire primario. Por ello, en vez de definir un intervalo de tiempo definido por las temperaturas, se define en función de un caudal medio elegido arbitrariamente, e igual para todas las pruebas.

La forma de proceder es similar a la anterior, sólo que en la hoja de cálculo, en vez de tomar los instantes de tiempo en los que la temperatura toma los valores de 40°C y 60°C,  $t_{40}$  y  $t_{60}$ , se toma para cada prueba dos temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , obteniendo así los instantes  $t_{T_1}$  y  $t_{T_2}$ . El resto de parámetros se calcula de forma análoga al procedimiento normal.

La elección de estas dos temperaturas ha de ser tal que  $\Delta T = T_2 - T_1$  y el caudal medio en el intervalo sea igual para todas las pruebas.

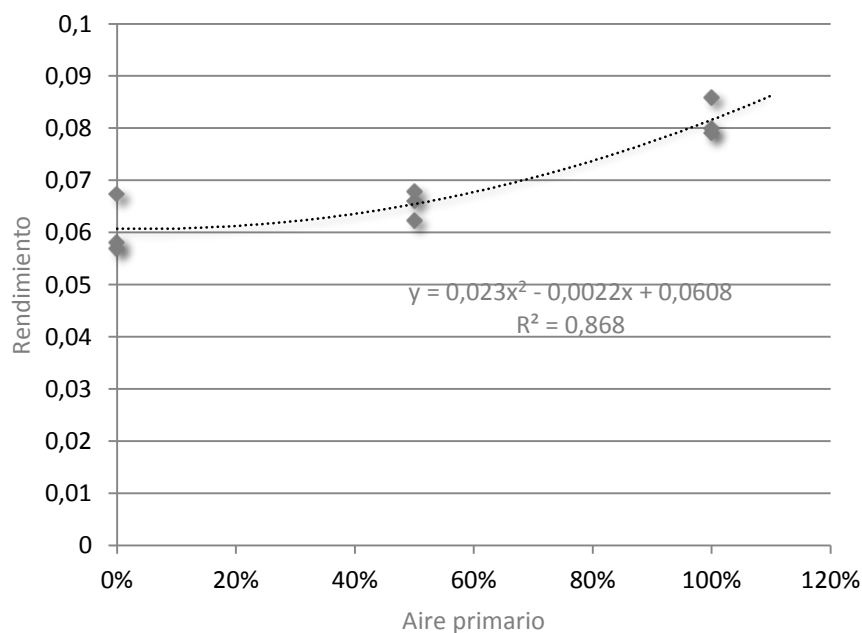
La elección de diferentes intervalos de temperaturas para cada prueba, no supone una variación del calor absorbido por el agua, siempre y cuando  $\Delta T$  sea igual para todas las pruebas, debido a que este es en realidad igual a la variación de la energía interna, que es función de estado.

En la tabla 5.5, se muestra los intervalos de temperatura para cada prueba, así como los caudales medios de biogás en dicho intervalo.

Caudal medio propuesto ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Intervalo de temperaturas propuesto $\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Prueba	$T_1$	$T_2$	$V'_{T_1-T_2}$
$0,00013 \pm 0,00001$	10	1	51	61	0,000129
		2	57	67	0,000130
		3	57	67	0,000130
		4	38	48	0,000129
		5	42	52	0,000129
		6	38	49	0,000131
		7	43	53	0,000130
		8	44	54	0,000130
		9	47	57	0,000129

**Tabla 5.5. Intervalos de temperatura seleccionados para cada una de las pruebas del experimento II (Aire Primario). Fuente: Elaboración propia**

De la representación del rendimiento frente al porcentaje de aire primario para los datos mostrados en la tabla 5.5, se obtiene la ilustración 5.18.



**Ilustración 5.18. Resultados de experimento II (Aire primario), rendimiento frente al caudal de aire primario. Fuente: Elaboración propia**

Se puede observar como existe un claro descenso del rendimiento de la transmisión de calor a medida que se restringe la entrada de aire primario mediante la oclusión parcial de las lumbreras. El mayor rendimiento se da cuando las lumbreras se encuentran completamente descubiertas, ya que permite una mayor penetración de aire al sistema de premezcla.

Esto se debe principalmente a una mejora del rendimiento de la reacción cuando existe un cierto exceso de aire, frente a la falta de este, tal y como se explica en el ANEXO B (Combustión). A pesar de que resultó imposible realizar un estudio de los humos de combustión, es probable que existieran

una mayor cantidad de inquemados y partículas nocivas para la salud para las pruebas en las que se cerraban las lumbreras, aunque esta experiencia no nos permite la afirmación de este razonamiento.

Estas pruebas nos sirven para concluir que se obtiene el mayor rendimiento del quemador para las lumbreras completamente descubiertas. Sin embargo existe la limitación del tamaño establecido para éstas, es decir, esta prueba no prevé la mejora o empobrecimiento del rendimiento en el caso de hacer unas lumbreras de mayor tamaño, simplemente establece que para el rango de áreas con las que se trabaja para la entrada de aire primario, el mejor rendimiento se da cuando esta área es la máxima posible.

Así pues como conclusión final y como base para el modelo del quemador, se establece que las lumbreras calculadas por el método analizado en el punto 4, tienen un tamaño óptimo para la introducción de aire primario, y que no es necesario ningún sistema de control de su sección, ya que la disminución de ésta empobrecería el rendimiento.

### 5.6.3. Experimento III. Caracterización de la carcasa de ladrillo.

El objetivo de este experimento es el de obtener una relación entre el rendimiento obtenido para la carcasa de pruebas (metal) y la carcasa definitiva de bajo costo (ladrillo). Para ello se realizaron experiencias para distintos caudales de biogás, y una distancia idéntica entre la perola y el quemador que la establecida en el Experimento I, sólo que utilizando la carcasa de ladrillo que se muestra en la ilustración 5.8.

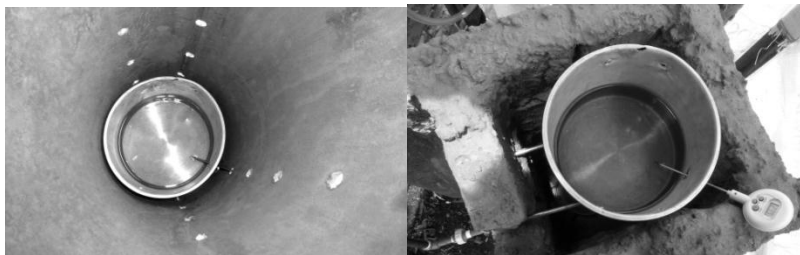
En la tabla 5.6 se muestra un resumen de las pruebas llevadas a cabo para este experimento.

Fechas de realización		
31/01/2013-01/02/2013		
Parámetros fijos		
Carcasa	Ladrillo	
a <sub>q</sub> (cm)	10	
Aire Primario	100%	
Quemador	QS <sub>1/2</sub>	
Parámetros variables		
	Tipo	Total
Masa de control	m <sub>1</sub> , m <sub>2</sub> , m <sub>3</sub> , m <sub>4</sub>	4
3	Pruebas por combinación	
Total pruebas		12

**Tabla 5.6. Resumen experimento III (Caracterización de la carcasa de ladrillo). Fuente: Elaboración propia**

Para la obtención de los resultados de este experimento se procedió de la misma forma que en el Experimento I. De los datos obtenidos en el ANEXO C podemos representar de la misma forma que hacíamos para la primera prueba, el calor medio absorbido y el rendimiento en función del caudal de biogás (Ilustración 5.20)

Para comparar y buscar una relación con el rendimiento obtenido para la carcasa de metal se representan los puntos obtenidos tanto para la carcasa de ladrillo como para ésta última, los cuales se extraen del Experimento I.



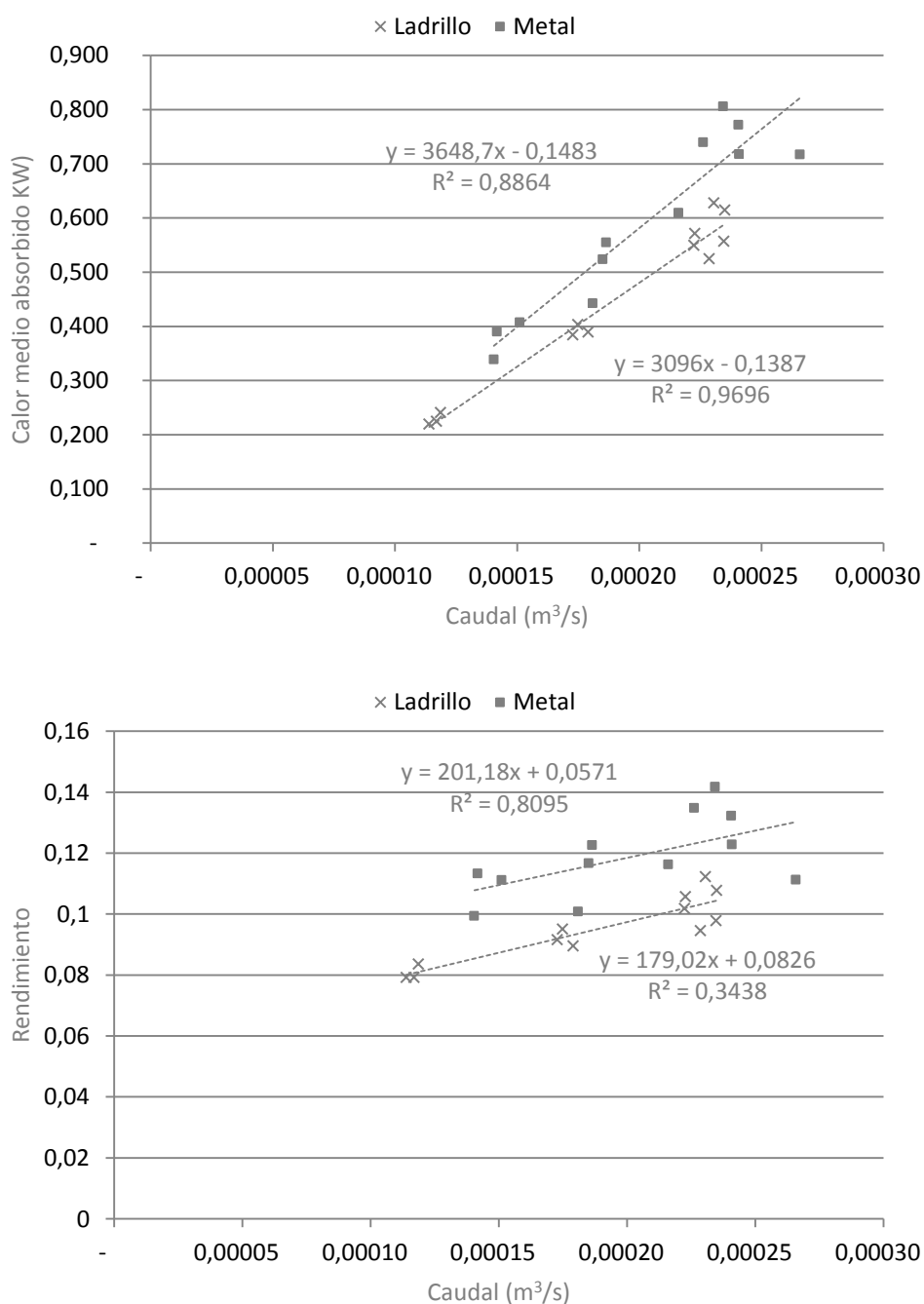
**Ilustración 5.19. Sección de paso de los GPC en la carcasa de metal y de ladrillo.**



Tal y como era de esperar, los resultados del calor absorbido siguen una tendencia lineal ascendente con el caudal de biogás utilizado.

El calor absorbido por la perola para la carcasa de ladrillo es inferior al absorbido cuando se utilizaba la carcasa metálica. Esto tiene su explicación: La carcasa de ladrillo tiene una mayor resistencia a la conducción, debido a su mayor espesor y a que el material es mucho menos conductor del calor que el metal, por lo que cabría esperar unas pérdidas al ambiente inferiores, y probablemente así sea, sin embargo, por la configuración de esta carcasa, de planta cuadrada, presenta una mayor sección de paso para los GPC que la planta circular de la carcasa metálica tal y como se observa en la ilustración 5.19. Esto hace que los GPC atraviesen la perola a menor velocidad, disminuyendo el coeficiente de convección y consecuentemente, reduciendo el calor transferido al agua.

Al representar así mismo el rendimiento respecto del caudal también se observa que es menor para la carcasa de ladrillo por la razón antes explicada.



**Ilustración 5.20. Resultados de experimento III (Carcasa de ladrillo), calor absorbido (arriba) y rendimiento (abajo) frente al caudal de biogás. Fuente: Elaboración propia**

Si representamos estos rendimientos para cada caudal a partir de la recta ajustada obtenemos la tabla 5.7. Y dividiendo el rendimiento obtenido para la carcasa de ladrillo por el rendimiento para la carcasa de metal obtenemos una relación entre la carcasa de ladrillo y la carcasa de metal (última columna). Por la observación de estos datos podemos comprobar que el calor transmitido cuando usamos la carcasa de ladrillo es de en torno al 80% del calor transmitido cuando utilizamos la carcasa de metal.

$V'_{\text{bio}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$\eta_{\text{metal}}$	$\eta_{\text{ladrillo}}$	
0,00015	0,11	0,09	0,77
0,00016	0,11	0,09	0,78
0,00017	0,12	0,09	0,78
0,00018	0,12	0,09	0,79
0,00019	0,12	0,10	0,79
0,00020	0,12	0,10	0,80
0,00021	0,12	0,10	0,80
0,00022	0,13	0,10	0,81
0,00023	0,13	0,10	0,81
0,00024	0,13	0,11	0,82
0,00025	0,13	0,11	0,82
0,00026	0,13	0,11	0,82
0,00027	0,13	0,11	0,83
0,00028	0,14	0,11	0,83
0,00029	0,14	0,12	0,84
0,00030	0,14	0,12	0,84

**Tabla 5.7. Comparación de rendimientos en la transferencia de calor entre la carcasa de metal y la de ladrillo. Fuente: Elaboración propia**

A la vista de estos datos podemos concluir que resulta indispensable ajustar lo más posible la sección de la carcasa, al elemento a calentar, que en el caso del modelo diseñado, es el intercambiador. Así, si se construye una carcasa de ladrillo de base cuadrada, los rendimientos de transmisión de calor serán menores a los dados por el modelo (que supone una cámara cilíndrica). Por ello, es necesario conformar, dentro de la cámara de base cuadrada, unas paredes, que se ajusten lo máximo posible a la geometría cilíndrica del intercambiador.

#### 5.6.4. Experimento IV. Serpentin helicoidal.

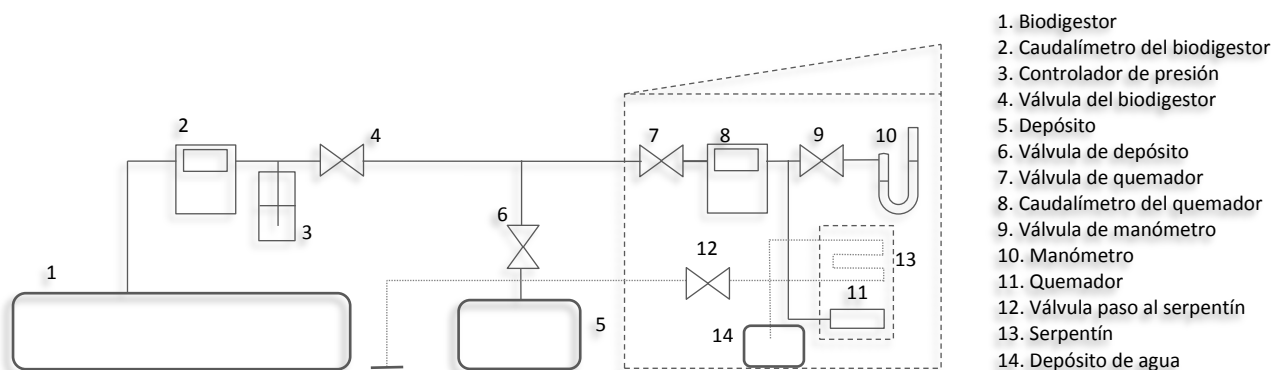
Esta prueba difiere de las anteriores en diversos puntos que se analizan a continuación.

##### 5.6.4.1. Instalación modificada

Para este experimento, la instalación descrita en el apartado 5.2, fue modificada para adaptar un caudal de agua continuo por el interior del calentador.

Tal y como muestra la ilustración 5.21, el circuito de gas es exactamente el mismo que para el resto de experimentos, la única modificación es, como se ha comentado, la creación de un circuito de agua para hacer funcionar el serpentín.

El agua se extrajo de una fuente de la línea general del matadero, situada a escasos metros de la caseta construida. La fuente utilizada constaba de una llave de paso previamente instalada. Lo que se hizo fue desmontar esta llave, y conectar una manguera directamente a la fuente. La llave desmontada se colocó al final de la manguera (12), cerca del lugar de pruebas para una mayor comodidad, y daba paso directamente al serpentín (13). Para cada prueba, se abría la válvula al serpentín y el agua circulaba por su interior, hasta un depósito (15), donde se recogía la totalidad del agua utilizada en cada experiencia para medir el caudal medio.



**Ilustración 5.21. Esquema de instalación para el experimento VI (Serpentín helicoidal). Fuente: Elaboración propia**

#### 5.6.4.2. Instrumentación alternativa

A excepción de la perola, el resto de elementos antes nombrados para las pruebas previas fueron utilizados, además de los que a continuación se nombran:

- Serpentín

Para simular el intercambiador se utilizó un tubo de cobre de 5 y 8 mm de diámetro interno y externo respectivamente al que se le dio forma de serpentín tal y como se muestra en la ilustración 5.22. Tenía un total de 21 espiras separadas 4 mm entre ellas y un diámetro total de 100mm. Para adaptar el serpentín a las mangueras de entrada y salida se utilizaron dos adaptadores también de cobre.

- Tubo transparente de media pulgada

A la salida del serpentín se añadió una manguera de plástico blando transparente para observar la salida del agua del calentador e implementar una toma para medir la temperatura del agua de la forma en que aparece en la ilustración 5.22.

- Depósito de agua

Se utilizó un bidón de agua de 20 litros de capacidad para acumular la totalidad de agua consumida en una prueba, y poder calcular, a partir de este volumen y el tiempo medido, el caudal medio de agua. A este bidón se le marcaron en un lateral los niveles para volúmenes de agua (Ilustración 5.22). El error de medida de este sistema se consideró alto, dadas las condiciones para construirlo, en torno a 0,5 litros.



**Ilustración 5.22. Serpentín helicoidal de cobre (izqda.), depósito de agua (centro) y tubo transparente (dcha.)**

#### 5.6.4.3. Procedimiento

El procedimiento para la obtención de datos es similar al seguido para los primeros experimentos.

- Llenado del depósito de biogás. El llenado del depósito se realizaba de la misma manera y se describe más extensamente en el apartado 5.4.
- Mientras se llenaba el depósito se abría la llave de paso del agua y se hacía circular un cierto caudal por el serpentín. Se calculaba un caudal de agua inicial controlando el tiempo que le costaba llenar una botella de medio litro. Se realizaban tres medidas y se calculaba

la media. Con ello se pretendía obtener un caudal de agua determinado antes de comenzar con la prueba.

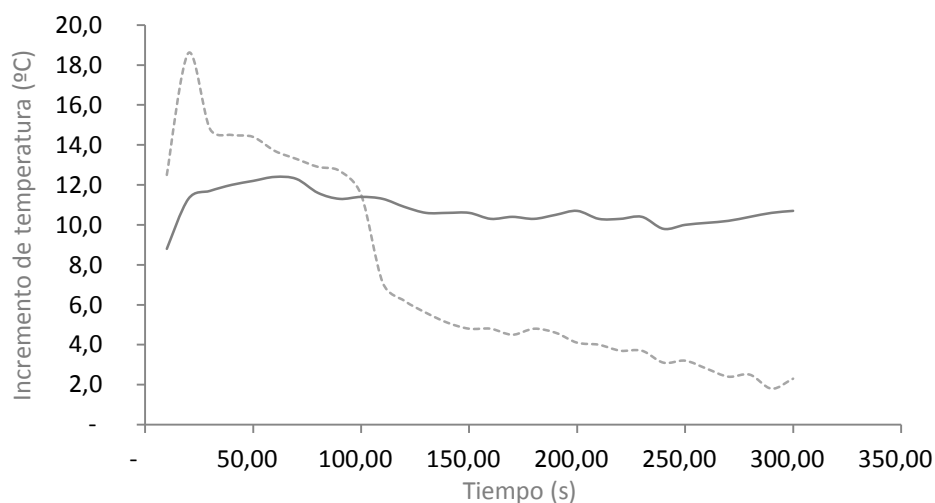
- Una vez el depósito estaba lleno, se cerraba la válvula del biodigestor, y se colocaba encima del depósito una masa concreta para conseguir el caudal de biogás requerido.
- Se tomaba la temperatura de salida del agua del serpentín en esta situación, sin encender el quemador. Para toda la prueba, esta temperatura “inicial” se supondría la temperatura de entrada de agua al serpentín.
- En esta situación se abría la válvula del gas al calentador y se encendía el quemador por el procedimiento indicado para las pruebas anteriores. También se metía la manguera de salida del serpentín en el depósito de acumulación y se comenzaba a contar el tiempo.
- Los datos de volumen de biogás consumido y temperatura de salida del agua se tomaban en intervalos de 10 segundos en un periodo total de 5 minutos.
- Transcurrido el periodo, se cortaba el caudal de gas y se sacaba la manguera de salida del serpentín del depósito donde se acumulaba el agua de toda la prueba. Se abría la válvula del biodigestor para que el depósito fuera llenándose de nuevo.
- Se medía el volumen de agua consumida en 330 segundos (5 minutos de prueba más 30 segundos más) y a partir del dato se calculaba el caudal medio de agua de la prueba. Mientras el agua seguía circulando por el serpentín durante un rato, hasta que la temperatura de salida fuera similar a la temperatura medida antes de la prueba. De esta forma se refrigeraba el calentador y se partía de condiciones similares en cada prueba.
- Finalmente se cortaba el agua.

Por procedimiento mencionado antes, eventualmente, también se medía la temperatura del biogás utilizado.

#### 5.6.4.4. Análisis de los resultados

Al igual que en las pruebas previas el caudal de biogás iba variando a lo largo de toda la prueba debido al razonamiento explicado anteriormente. Esto dificultaba la toma de datos, ya que el calor transferido al serpentín era variable respecto al tiempo.

Además de este problema, se le sumaba el control del caudal de agua. Dado que este caudal no podía medirse instantáneamente, sino, únicamente al principio de la prueba y al final por los métodos mostrados en el apartado anterior había que suponerlo constante e igual al valor medio medido al final. Esto en realidad podía no ser así, ya que debido a las fluctuaciones propias de la red del matadero, el caudal podía variar en un momento dado por causas ajenas al experimento. Esto quedaba a veces reflejado al representar la temperatura de salida en función del tiempo, tal y como se muestra en la ilustración 5.23. Si el caudal de agua aumentaba, el calor generado provocaba un incremento menor en la temperatura y si el caudal disminuía este incremento era mayor.

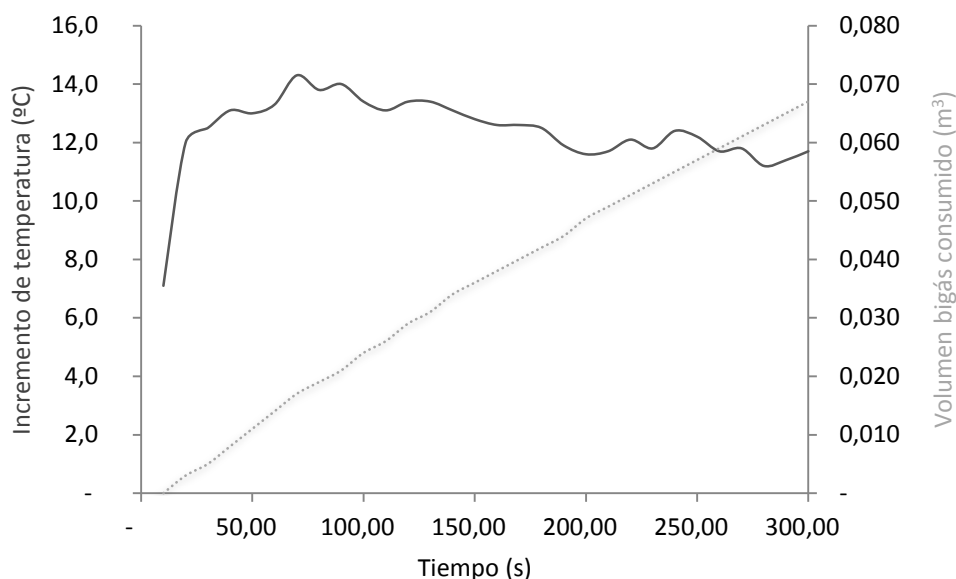


**Ilustración 5.23.** Representación del incremento de temperatura en el serpentín en función del tiempo para una prueba en la que a variado el caudal de agua (discontinua) y otra en la que no (continua). Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 5.23 la línea continua representa un experimento, en el cual el caudal de agua se ha mantenido más o menos constante, mientras que la línea discontinua muestra cómo ha habido un aumento del caudal de agua hacia el segundo 100. Precisamente, en esta prueba al final se volvió a medir el caudal por el mismo procedimiento a como se hacía al principio y se vio que el caudal había aumentado en casi 1 L/min.

Otro factor variable importante que afectaba a las pruebas era la temperatura del agua de entrada al serpentín. Esta temperatura dependía en gran medida de la radiación solar a la que estaba sometida la manguera utilizada. En la mayoría de las pruebas la temperatura de entrada fue de en torno a 20°C, sin embargo, en las tres primeras esta temperatura fue de 28°C, (día soleado).

Todas las pruebas realizadas para este experimento aparecen también en el ANEXO D y para el cálculo de los resultados a analizar se procedió de forma diferente a las pruebas anteriores:



**Ilustración 5.24. Representación del incremento de temperatura y el volumen de biogás consumido para una prueba aleatoria. Fuente: Elaboración propia**

- Se parte de los datos experimentales de tiempo  $t$ , temperatura  $T$  y volumen de biogás consumido  $V$ .
- Con los tres valores de tiempo tomados al inicio de la prueba  $t_i$  se obtiene el caudal de agua inicial con el que se comenzó la prueba  $V'_{ag,i}$  en L/min:

$$V'_{ag,i} = \frac{60 \cdot 0,5}{[(t_1 + t_2 + t_3)/3]} \quad (5.19)$$

- Con el volumen de agua recogido durante toda la prueba se obtiene el valor de caudal de agua medio  $V'_{ag,m}$  en L/min:

$$V'_{ag,m} = \frac{V_{agua} \cdot 60}{330} \quad (5.20)$$

- Se calcula el incremento de temperatura en cada instante  $T_{estd}$  restando la temperatura en cada momento, por la temperatura medida al inicio de la prueba, la cual se considera la temperatura de entrada del agua al intercambiador:

$$T_{estd} = T(t) - T(t = 0) \quad (5.21)$$

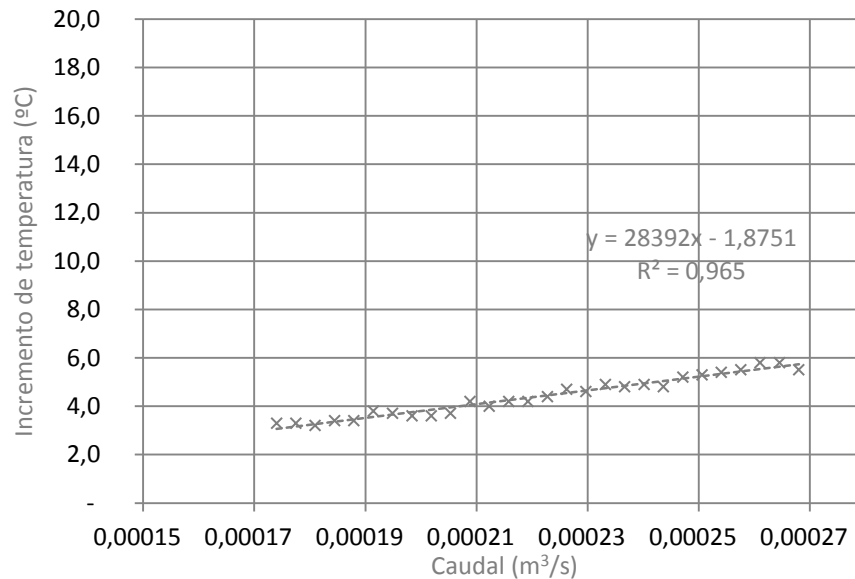
- Se estandariza el volumen de biogás consumido  $V_{estd}$ , ya que los valores obtenidos directamente son los indicados por el contador de gas. De esta forma obtenemos el volumen de biogás consumido en dicha prueba a partir de los 20 primeros segundos.
- Se aproximan los valores del volumen estandarizado  $V_{estd}$ , por medio de una regresión cuadrática y se obtiene una ecuación de la forma ecuación. 5.8. La curva representaba bien el fenómeno antes comentado en el que el volumen consumido al principio de la

prueba era mayor al consumido al final de la prueba. Se obtenían de esta forma los valores de  $a$ ,  $b$  y  $c$ .

- La derivación de esta ecuación conduce a la curva del caudal con el tiempo (Eq. 5.9).
- Se representa el incremento de temperatura frente al caudal de biogás tal y como se muestra en la ilustración 5.25
- Por una regresión lineal se obtiene la recta ajustada a los datos de la forma

$$T = bV' + c \quad (5.22)$$

De esta forma se obtiene una relación experimental entre el caudal de biogás quemado, y el incremento de temperatura provocado en el intercambiador para un caudal de agua medio y una temperatura de entrada de agua dada.



**Ilustración 5.25.** Representación gráfica del incremento de temperatura en función del caudal de biogás y recta ajustada, para una prueba aleatoria. Fuente: Elaboración propia

#### 5.6.4.5. Resultados y conclusiones

En la tabla 5.8 se muestra un resumen de las pruebas llevadas a cabo para este experimento.

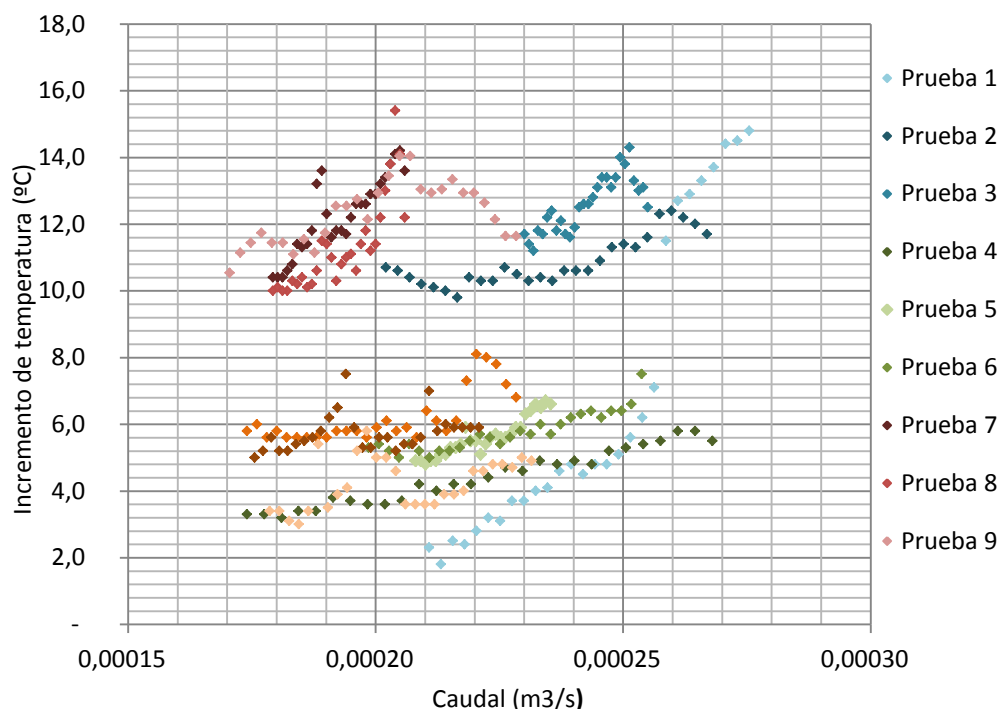
Fechas de realización		
05/02/2013-07/02/2013		
Parámetros fijos		
Carcasa	Metal	
a <sub>q</sub> (cm)	13	
Aire Primario	100%	
Quemador	QS <sub>1/2</sub>	
Parámetros variables		
	Tipo	Total
Masa de control	m <sub>3</sub> , m <sub>4</sub>	2
Caudal de agua (L/min)	1 y 2,5	2
3 Pruebas por combinación		
Total pruebas		12

**Tabla 5.8.** Resumen experimento IV (Serpentín helicoidal). Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 5.26 aparecen todos los puntos calculados para cada una de las pruebas, y debajo en la tabla 5.9 se indican las condiciones para cada una de las experiencias.

Al observar la gráfica se observa que los puntos se pueden distribuir en cuatro cuadrantes. En el cuadrante superior derecho, se sitúan los puntos en los que se trabaja con mayores caudales de biogás y un caudal de agua menor. Esto provoca un mayor incremento de temperatura. En el cuadrante superior izquierdo se encuentran los puntos medidos para un menor caudal de biogás y el mismo caudal de agua. En los cuadrantes inferiores los puntos se distribuyen de forma similar, sólo que trabajando con un caudal de agua mayor, esto hace que el incremento de temperatura sea inferior ya que se está intentando calentar una mayor cantidad de agua con una potencia parecida.

En las pruebas se intentó calcular puntos para cada uno de esos cuadrantes, y de esta forma buscar una relación clara entre el caudal de biogás, el caudal de agua, y el incremento producido en la temperatura de salida. Las pruebas 1 a 6 se trabaja con un caudal de 1 L/min, por lo que el incremento de temperatura producido es mayor que en las pruebas 7 a 12, en los que se trabaja con un caudal de 2,5 L/min.



**Ilustración 5.26.** Representación de todos los puntos de incremento de temperatura frente a caudal de la totalidad de las pruebas. Fuente: Elaboración propia

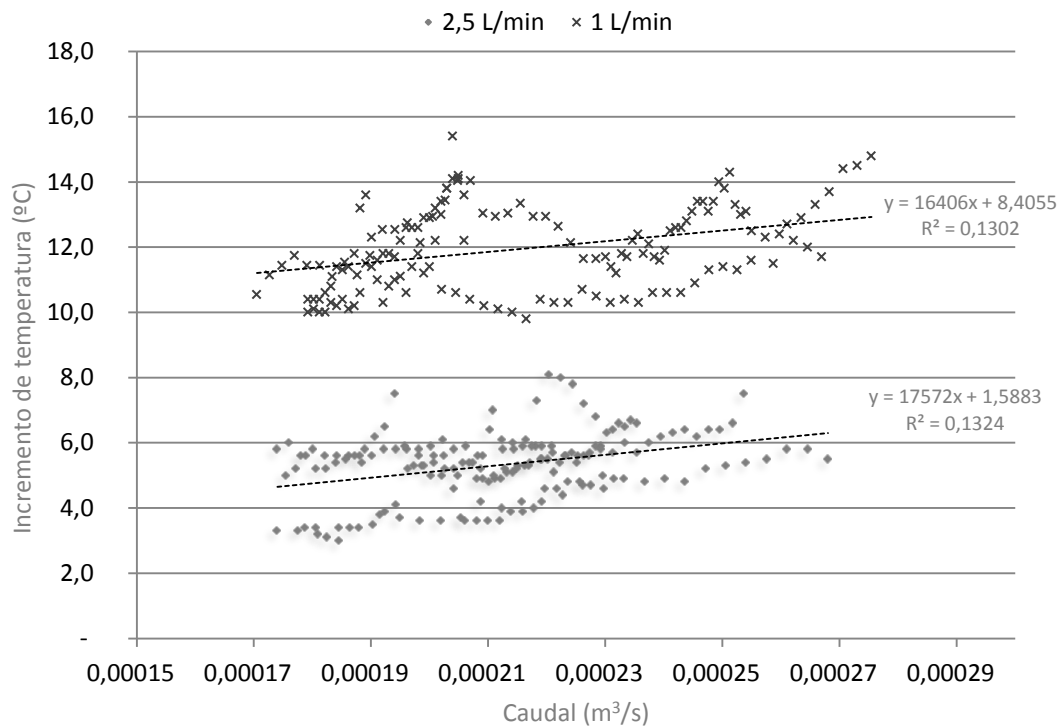
Masa de control	Caudal de agua	Pruebas
m <sub>4</sub>	1 L/min	1, 2 y 3
	2,5 L/min	4, 5 y 6
m <sub>3</sub>	1 L/min	7, 8 y 9
	2,5 L/min	10, 11 y 12

**Tabla 5.9.** Características de cada una de las pruebas realizadas con el serpentín. Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, conviene señalar algunas irregularidades que surgen en la gráfica:

- En primer lugar, se puede observar como para la Prueba 1 existen puntos situados en el cuadrante superior e inferior derecho. Esto es debido a que durante la prueba hubo un aumento del caudal de agua de red con la que se alimentaba el serpentín. En la Ilustración 5.23, en la cual se representa el incremento de temperatura respecto al tiempo para esta prueba, se observa como hay un descenso en la temperatura hacia el segundo 100. Esto se refleja en esta última gráfica, en que para caudales similares se produce un calentamiento menor de agua debido a su mayor caudal, haciendo caer parte de los puntos al cuadrante inferior. Estos puntos serán eliminados del estudio final ya que se desconoce el caudal de agua exacto para el que fueron tomados.

- Por otro lado las tres primeras pruebas fueron realizadas para una temperatura de entrada del agua de unos 28°C mientras que en el resto, esta temperatura fue de en torno a 20°C. Dado que el mecanismo por el que se transfiere el calor al agua es la convección, el cual depende de la diferencia de temperatura entre los GPC y el agua, cabría esperar que si esta diferencia fuese menor (como en el caso de las tres primeras pruebas) se transmitiese una cantidad proporcionalmente inferior de calor al agua. Esto haría que los puntos obtenidos con una temperatura de entrada de 28°C experimentasen un incremento de temperatura inferior. Sin embargo, al observar la Ilustración 5.27, vemos como las rectas ajustadas para el caudal de 2,5 litros, en el cual la totalidad de los puntos han sido obtenidos con una temperatura de entrada de 20°C, y para el caudal de 1 litro, en el cual la mitad de los puntos se obtuvo con una temperatura de entrada de 28°C, son prácticamente paralelas. Lo cual hace pensar que la temperatura del agua no influye en gran medida en el intercambio de calor. Esto es así porque la existe una gran diferencia entre la temperatura del agua y los GPC.



**Ilustración 5.27.** Representación de las rectas ajustadas para los datos de 1L/min (arriba) y 2,5 L/min (abajo). Fuente: Elaboración propia

Así pues obtenemos dos rectas aproximadas que nos relacionan el caudal de biogás utilizado en el quemador, con el incremento de temperatura experimentado por un caudal de agua al atravesar un serpentín. Estas dos rectas son:

$$\begin{aligned}\Delta T_1 &= 16406V'_{bio} + 8,4055 \\ \Delta T_{2,5} &= 17572V'_{bio} + 1,5883\end{aligned}\quad (5.23)$$

A partir de estas fórmulas podemos crear una tabla con la que posteriormente comprobar y corregir el modelo creado:

$V'_{bio} (m^3/s)$	$\Delta T_1 (°C)$	$\Delta T_{2,5} (°C)$
0,00015	10,9	4,2
0,00020	11,7	5,1
0,00025	12,5	6,0
0,00030	13,4	6,9

**Tabla 5.10.** Resultados con base experimental del incremento de temperatura en un serpentín para diferentes caudales de biogás. Fuente: Elaboración propia



#### 5.6.4.6. Comparación de los datos experimentales con el modelo

En base a los resultados de esta última prueba se pretende comprobar y en su caso corregir el modelo de intercambiador propuesto en el capítulo anterior. Para ello es necesario introducir en el modelo los mismos parámetros bajo los cuales se realizaron las pruebas experimentales (tabla 5.11).

Dirección de flujo		A favor de corriente	
Geometría			
	$d_i$	5	mm.
	$d_e$	8	mm.
	$D_{max}$	100	mm.
	$S_T$	16	mm.
	$S_L$	16	mm.
	$a_i$	300	mm.
	$a_q$	100	mm.
	$l$	1	-
	$n$	21	-
	$m$	500	-
Material			
	$k_{Cu}$	385	W/m <sup>20</sup> C
	$\alpha_{Cu}$	0,78	-
Fluido interno			
	$\dot{V}_{ag}$	1-2,5	L/min
	$T_{inicial,ag}$	20	°C
Fluido externo			
	%CO <sub>2</sub>	45	-
	%CH <sub>4</sub>	55	-
	$x_{air}$	0,4 <sup>29</sup>	-
	$\dot{V}_{bio}$	0,00010-0,00030	m <sup>3</sup> /s
	$T_{inicial,GPC}$ <sup>30</sup>	775	°C
Externos			
	$Altitud$	2500	msnm
	$FC_{carcasa}$ <sup>31</sup>	1	-

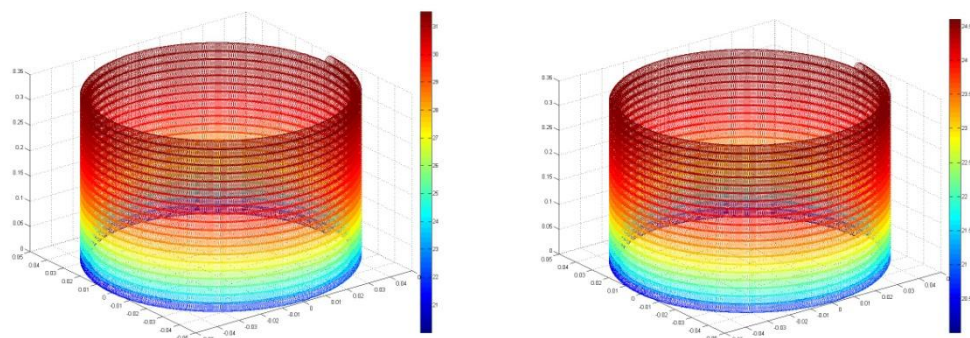
**Tabla 5.11. Valor de las variables introducidas en el modelo en MATLAB para comparación con resultados experimentales. Fuente: Elaboración propia**

Estos datos constituyen la base con la que realizar las comparaciones entre la experiencia realizada y el modelo generado en MATLAB. Si resolvemos para un caudal medio de biogás de 0,00020 m<sup>3</sup>/s podemos hacernos una idea de las temperaturas aproximadas en el serpentín para la experiencia realizada. El uso de un mayor caudal de agua provoca una brusca disminución en el incremento de la temperatura tal y como se observa en la Ilustración 5.29. También podemos observar como la mayor parte del calentamiento en ambos casos se lleva a cabo en la primera mitad del serpentín, mientras que en la segunda mitad apenas varía la temperatura (mismo color), ilustración 5.28, por lo que a efectos prácticos resulta innecesaria.

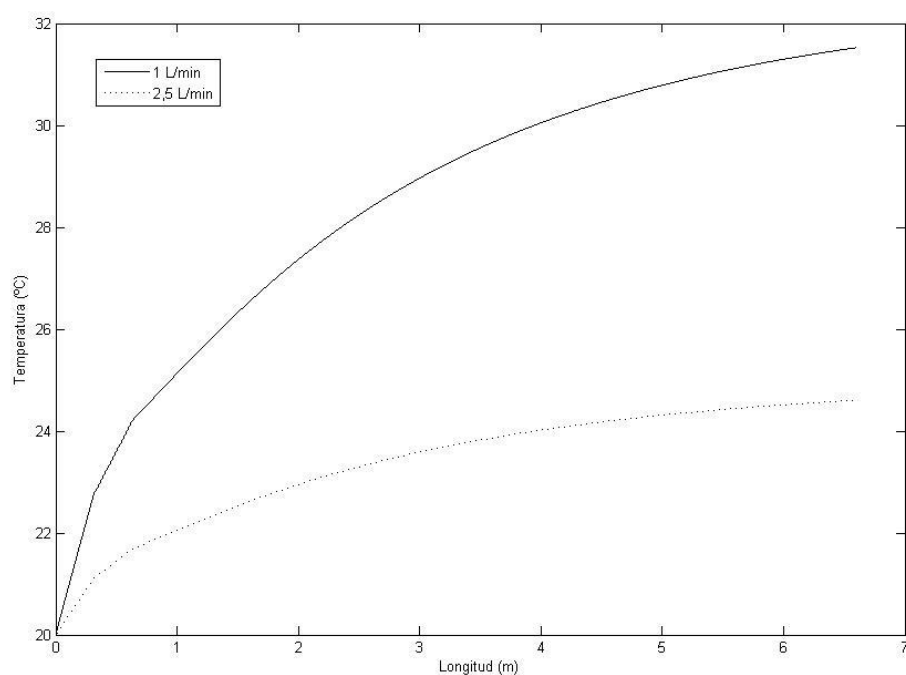
<sup>29</sup> El exceso de aire para este modelo lo obtenemos del exceso de aire real que nos da al implementar el modelo para el quemador. de las pruebas (tabla 4.4)

<sup>30</sup> La temperatura de los gases se ajusta a 775°C para acomodarlo a los resultados experimentales. Esta temperatura no deberá modificarse en adelante al implementar el modelo.

<sup>31</sup> El factor de corrección de la carcasa toma el valor 1 cuando la sección de la carcasa es similar al diámetro superior establecido para la cámara cilíndrica del modelo. En este caso la carcasa metálica toma el mismo diámetro.



**Ilustración 5.28.** Distribución de temperaturas en el serpentín para un caudal de agua de 1L/min (izqda.) y 2,5 L/min (dcha.) . Fuente: Elaboración propia

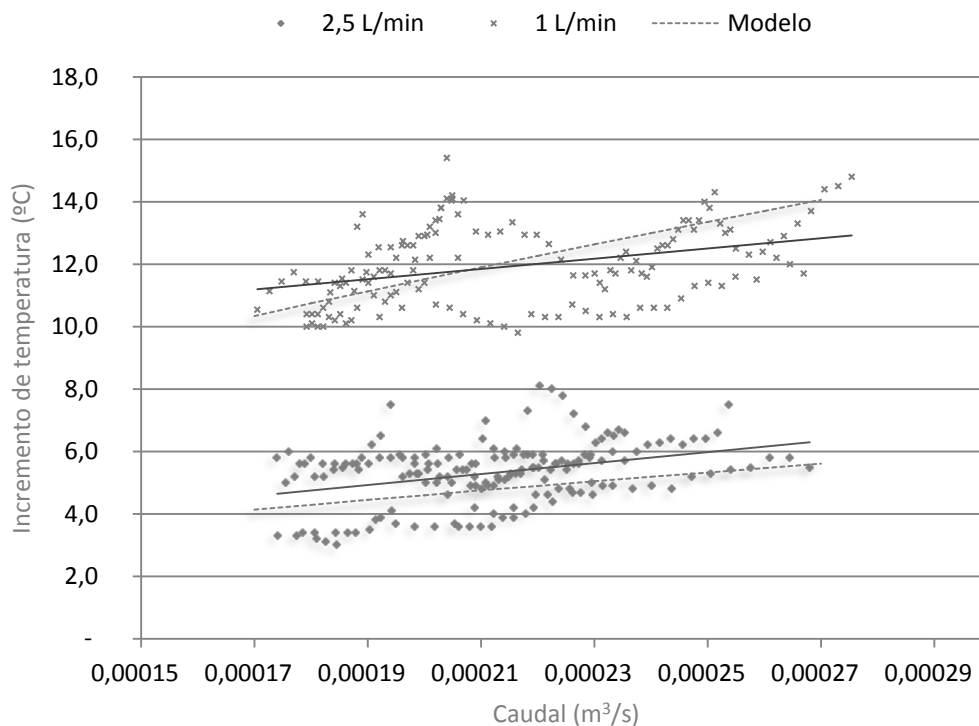


**Ilustración 5.29.** Temperatura del agua en función de la longitud recorrida del serpentín. Fuente: Elaboración propia

Para comparar los resultados teóricos con los experimentales calculamos mediante el modelo, los incrementos de temperatura para diferentes caudales de biogás, una vez ajustada la temperatura inicial de los GPC a 775 °C, dentro del rango utilizado en la prueba, y para los dos caudales de agua antes vistos. Así obtenemos la tabla 5.12 en el que aparecen los resultados dados por el modelo, así como los obtenidos en la tabla 5.10.

	1 L/min			2,5 L/min		
	Experimental	Modelo	Diferencia	Experimental	Modelo	Diferencia
0,00015	10,9	9,0	1,9	4,2	3,6	0,6
0,00020	11,7	11,2	0,5	5,1	4,5	0,6
0,00025	12,5	13,3	0,8	6,0	5,3	0,7
0,00030	13,4	15,2	1,8	6,9	6,0	0,9

**Tabla 5.12.** Comparación en las temperaturas de salida del agua en °C del modelo y experimental, para varios caudales de biogás y de agua. Fuente: Elaboración propia



**Ilustración 5.30.** Comparación gráfica de los datos experimentales (puntos y líneas continuas) y los resultados del modelo en MATLAB (líneas discontinuas). Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar no existe una gran desviación entre los resultados obtenidos experimentalmente, y los simulados mediante el modelo, dentro del rango de caudales de biogás utilizado. No obstante cabe destacar varios puntos:

- Las pendientes de las rectas ajustadas a los datos experimentales difieren ligeramente de las obtenidas para el modelo. Para caudales de agua altos, esta pendiente es ligeramente inferior. Para el caso del caudal de 1 L/min la pendiente difiere bastante, lo cual provoca que exista una diferencia en los incrementos de temperatura para caudales de biogás extremos.
- Por otro lado, a diferencia de las rectas ajustadas en los experimentos que son casi paralelas, las pendientes para el modelo difieren al variar el caudal de agua. Esto es más coherente con la teoría, ya que al disminuir el caudal de agua, ésta es más sensible a las variaciones de caudal del otro fluido, en su caso, los GPC, directamente proporcional a su vez al caudal de biogás.

Aún con todo, y a pesar de las pequeñas disparidades entre el modelo y los experimentos, se concluye, que los resultados obtenidos de forma teórica son satisfactorios. Por consiguiente no se considera necesaria la utilización de ningún factor de corrección en el programa, y se establece como buena la temperatura propuesta para los GPC (775°C).



## 6. Guía de Construcción

---

Este capítulo pretende servir como guía básica para la construcción de un calentador de agua con biogás. Para ello se ejemplifican dos escenarios distintos que nos aportarán datos reales acerca de las dimensiones y costes, y facilitarán la comprensión de los cálculos. Los cálculos serán extrapolables a cualquier otra situación.

En primer lugar se describe el escenario: condiciones geográficas y capacidades energéticas. Luego se detalla de forma práctica el cálculo y construcción de cada uno de los elementos (quemador, serpentín y carcasa), y se realiza un balance de costes. Por último se dan detalles acerca del mejor lugar para la colocación del dispositivo y el uso de éste mediante un reservorio de gas.



## 6.1. Definición del escenario

El objetivo es caracterizar el escenario para el cual está destinado el calentador de agua, y obtener el caudal de biogás del que se puede disponer para ponerlo en funcionamiento. Para la resolución del problema, el escenario queda completamente definido con los datos de:

- Altitud,  $Altitud[m]$ . Se trata de la altura sobre el nivel del mar a la que se sitúa la comunidad. Influye negativamente, ya que a mayor altura los gases pierden densidad, por lo que disminuye el rendimiento del intercambio.
- Temperatura ambiente,  $T_{air}[^{\circ}C]$ : Es la temperatura del aire que rodea al quemador. Es necesaria para el dimensionamiento del inyector, por lo que es importante que esta temperatura se tome exactamente del lugar donde se vaya a construir el calentador (En el exterior, o dentro de una habitación si es el caso)
- Temperatura del agua,  $T_{inicial,ag}[^{\circ}C]$ . Es la temperatura media del agua utilizada en la comunidad. Es un factor clave, ya que, a pesar de no influir en el rendimiento, cuanto menor sea la temperatura de entrada al calentador, tanto menor será la de salida para un consumo de combustible dado.
- Biogás diario disponible,  $V_{bio}[L]$ . Es una medida de la capacidad energética de la comunidad. Si la comunidad produce mucho biogás, podrá utilizar un mayor caudal en el calentador, pudiendo bien abaratar sus costes, o bien dar una mayor cobertura (más tiempo de agua caliente), en cualquier caso esta variable es la cantidad de biogás diario que se va a destinar al calentador.
- Temperatura del biogás,  $T_{biogás}[^{\circ}C]$ : es la temperatura a la que el biogás entra al inyector, dado que el gas procede de un depósito que se encuentre a una distancia del quemador, esta temperatura puede verse afectada por la radiación sobre el depósito, exposición a los elementos etc. por lo que es conveniente medirla.
- Composición del biogás  $\%CH_4$ . Es un dato necesario para implementar el modelo, aunque si se desconoce pueden tomarse los correspondientes a biodigestores alimentados con productos similares. La cantidad de metano suele rondar entre el 50 y el 70%. Se supondrá que el biogás únicamente metano y dióxido de carbono, por lo que el porcentaje de éste último vendrá dado por:

$$\%CO_2 = 100 - \%CH_4 \quad (6.1)$$

- Requerimientos energéticos,  $t[min]$  es una medida del tiempo de uso diario que se le va a dar al calentador. Este dato se puede traducir a número de duchas por día por ejemplo teniendo en cuenta el tiempo requerido para una única ducha (unos 10 min).

Los datos de altitud, temperatura del agua y composición de biogás son necesarios para introducir en el modelo. A partir del biogás diario disponible y los requerimientos, obtenemos el caudal de biogás, el cual también será un dato para introducir en el modelo, de la siguiente forma:

$$V'_{bio} \left[ \frac{m^3}{s} \right] = \frac{1}{60000} \cdot \frac{V_{bio}[L]}{t[min]} \quad (6.2)$$

La constante previa es necesaria para llevar a cabo el cambio de unidades.

## 6.2. Cálculo de elementos

Primeramente se diseña cada uno de los elementos, y posteriormente se explica el montaje del conjunto.

### 6.2.1. Diseño del quemador

Se pretende con diseño el cálculo de las dimensiones necesarias para construir un quemador como el que se muestra en la Ilustración 6.1, pero adaptado a las necesidades particulares de cada usuario.

Su cálculo se realiza exactamente igual que en el punto 4.1.4 en el que se calculan las dimensiones para el quemador experimental, sólo que ahora, con el programa modificado de MATLAB, que también nos da el diámetro del cabezal a utilizar en base a los resultados obtenidos en las pruebas. Tampoco es necesario obtener el caudal de biogás en términos de potencias y rendimientos, ya que viene definido por la ecuación 6.2



**Ilustración 6.1. Quemador diseñado para las pruebas experimentales de este trabajo. Cabezal (izqda.), garganta o tubo de mezcla (centro) e inyector (dcha.)**

El programa realiza todos los cálculos pertinentes, y únicamente hay que tomar los valores reales que se dan para la compra de material y mecanización de los diferentes elementos.

En la elección de materiales es importante que todos los elementos utilizados soporten bien las altas temperaturas, en especial, aquellos que están más cerca del cabezal.

### 6.2.2. Diseño del intercambiador

Se trata del elemento más costoso del calentador, por ello conviene ajustar su longitud al máximo para evitar un coste elevado.

Lo primero es seleccionar el tubo con el que se va a construir el calentador. Esto implica la selección de dos parámetros: el material, y las dimensiones. Teniendo en cuenta el primero de los parámetros existen multitud de materiales en el mercado: Cobre, latón, bronce, hierro, etc. Sin embargo, antes de su elección conviene tener en cuenta los siguientes requisitos:

- Buen conductor del calor (coeficiente de transferencia de calor  $k$  elevado).
- Capaz de soportar altas temperaturas sin deformarse ni mucho menos fundirse.
- Mecánicamente debe ser lo suficientemente dúctil, como para poder conformar el serpentín sin necesidad de maquinaria.
- Debe comprobarse que es posible conformar el serpentín de diámetro mínimo sin que se produzcan deformaciones indeseadas (estrechamiento del tubo).
- Resistente al óxido y la corrosión. La combinación de humedad y alta temperatura a las que se ve sometido el serpentín podrían degradarlo prematuramente.
- Económico. Debe tenerse en cuenta que se necesitarán en torno a 10 metros de tubo, por lo que conviene hacer una valoración de costes previa ya que el precio del intercambiador es determinante en el coste final del calentador.

En cuanto al tamaño del tubo (diámetro) este también influye sobre el rendimiento del intercambio.

Dado que las temperaturas más altas de los gases se encuentran en la parte baja del calentador, es lógico suponer, como criterio de diseño, que el intercambiador ha de cubrir la mayor área transversal posible, antes de añadir una altura más a las bobinas (Ver Ilustración 4.2). Es decir, dentro de los límites establecidos para el calentador ( $D_{superior}$  y  $D_{inferior}$ ), se ha de aprovechar el tubo construyendo el intercambiador con mayor número de bobinados concéntricos posible. Para ello, dado un tubo de diámetro  $d_e$  se ha de disponer las bobinas concéntricas a la mínima distancia:

$$S_T = \frac{3}{2} d_e \quad (6.3)$$

La separación longitudinal entre espiras consecutivas del mismo bobinado  $S_L$  se tomará por defecto igual a  $S_T$ . Y el diámetro de la bobina más externa deberá ser:

$$D_{m\acute{a}x} = D_{superior} \quad (6.4)$$



De esta forma obtendremos un intercambiador que aproveche la máxima área transversal posible para un tubo dado. En la tabla 6.1, aparece el número máximo de bobinados permisibles  $l_{m\acute{a}x}$  para tubos de diámetro externo comprendido entre 1 y 13 mm, la longitud para una única espira por bobina y el incremento de temperatura por metro de bobinado para unas condiciones estándar.

$d_e$ (mm)	$l_{m\acute{a}x}$	Longitud (m)	$\Delta T(^{\circ}\text{C}/\text{m})$
4,00	13	5,23	0,59
5,00	11	4,31	0,49
6,00	9	3,61	0,42
7,00	8	3,17	0,37
8,00	7	2,81	0,33
9,00	6	2,49	0,30
10,00	6	2,35	0,28
11,00	5	2,10	0,26
12,00	5	2,01	0,24
13,00	4	1,77	0,22

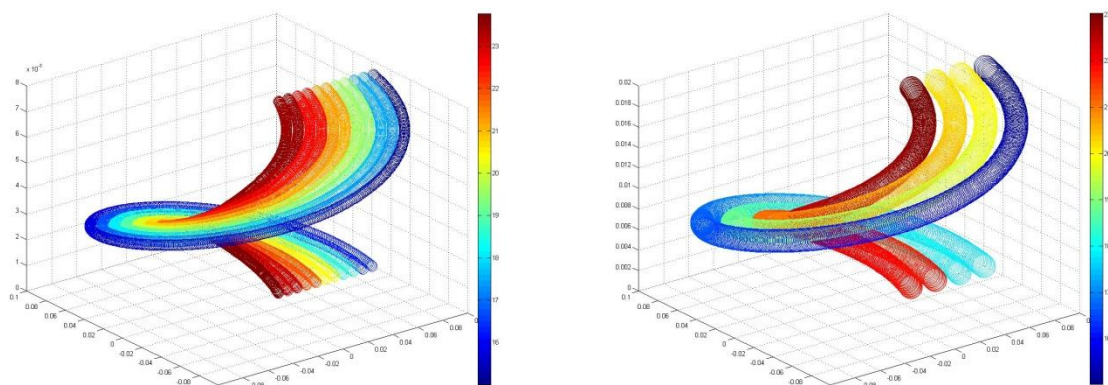
**Tabla 6.1. Número máximo de bobinados concéntricos para tubos de diferente diámetro externo. Fuente: Elaboración propia**

Altitud = 2500m  $V'_{ag} = 3\text{L}/\text{min}$ ,  $T_{\text{inicial},ag} = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $x_{air} = 0,1$   $T_{\text{inicial},GPC} = 1000^{\circ}\text{C}$ ,  $V'_{bio} = 0,00040\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $n = 1$ ,  $m = 5$

Podemos observar cómo a medida que se aumenta el diámetro externo del tubo la eficiencia del intercambio disminuye (menor incremento de temperatura por longitud de tubo). Esto añadido al hecho de que el tubo se encarece a medida que incrementamos su diámetro, nos lleva a la conclusión de que es preferible utilizar tubos de diámetros pequeños si queremos mejorar la eficiencia.

Además los tubos de diámetro superior a 8 o 9 mm tienen diámetros internos demasiado grandes para los caudales de agua con los que se va a trabajar. Es recomendable que si se va a trabajar con caudales de agua menores a 3 L/min. el diámetro interno  $d_i$  del tubo no sea mayor a los 6 mm.

Dado que se supone una presión de trabajo del fluido interno insuficiente como para provocar la rotura de cualquier tubería metálica, la relación entre el diámetro externo e interno, es decir, el espesor del tubo, debe ser lo más baja posible. De esta forma mejoraremos el intercambio de calor.



**Ilustración 6.2. Distribución de temperaturas para algunos de los casos mostrados en la tabla 6.1. Fuente Elaboración propia**

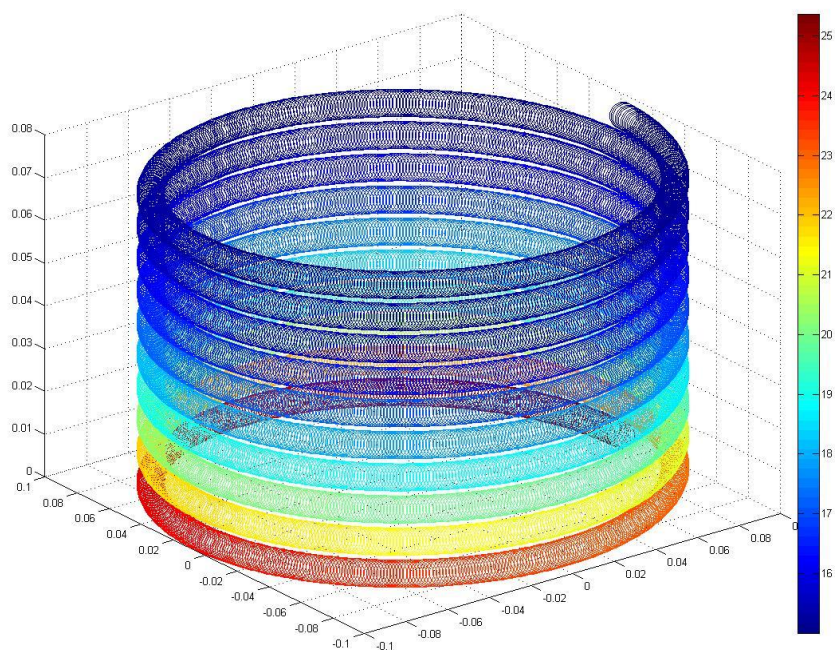
En caso de duda en la elección del tubo, habrá que valorar económicamente el intercambiador completo, es decir, resolver el modelo para todos los casos que se disponga, calcular la distancia total de tubo necesaria y la temperatura de salida del agua, y con el precio de cada tubo, obtener el coste total.

Una vez determinadas las propiedades relativas al tubo, y el número de bobinados concéntricos únicamente queda por fijar el número de espiras por bobinas. Su determinación es sencilla utilizando

el modelo. Para ello se hace una representación de la temperatura del agua en función de la longitud de intercambiador para un número arbitrario  $n$  de espirales por bobina.

El criterio en este caso es evitar que se produzcan zonas en las que la temperatura sea constante con la longitud.

Estas zonas en las que la temperatura es horizontal indican que el agua está recorriendo una parte del serpentín en la que no se produce apenas intercambio de calor. Se produce cuando la temperatura de los gases es tan baja que no existe gradiente de temperatura suficiente entre los dos fluidos para llevarse a cabo un intercambio de calor apreciable. Si los bobinados tienen demasiadas espiras (un intercambiador alargado) se producirá este fenómeno, ya que el agua recorrerá zonas "frías" del intercambiador sin aumentar su temperatura.



**Ilustración 6.3. Ejemplo de serpentín ineficiente. El intercambiador recorre zonas "frías" del calentador en las que el agua apenas aumenta su temperatura. Fuente: Elaboración propia**

---

Altitud = 2500m  $V'_{ag} = 2\text{L/min}$ ,  $T_{\text{inicial,ag}} = 15^\circ\text{C}$ ,  $x_{air} = 0,1$   $T_{\text{inicial,GPC}} = 1000^\circ\text{C}$ ,  
 $V'_{bio} = 0,00040\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $n = 10$ ,  $m = 5$ ,  $l = 1$

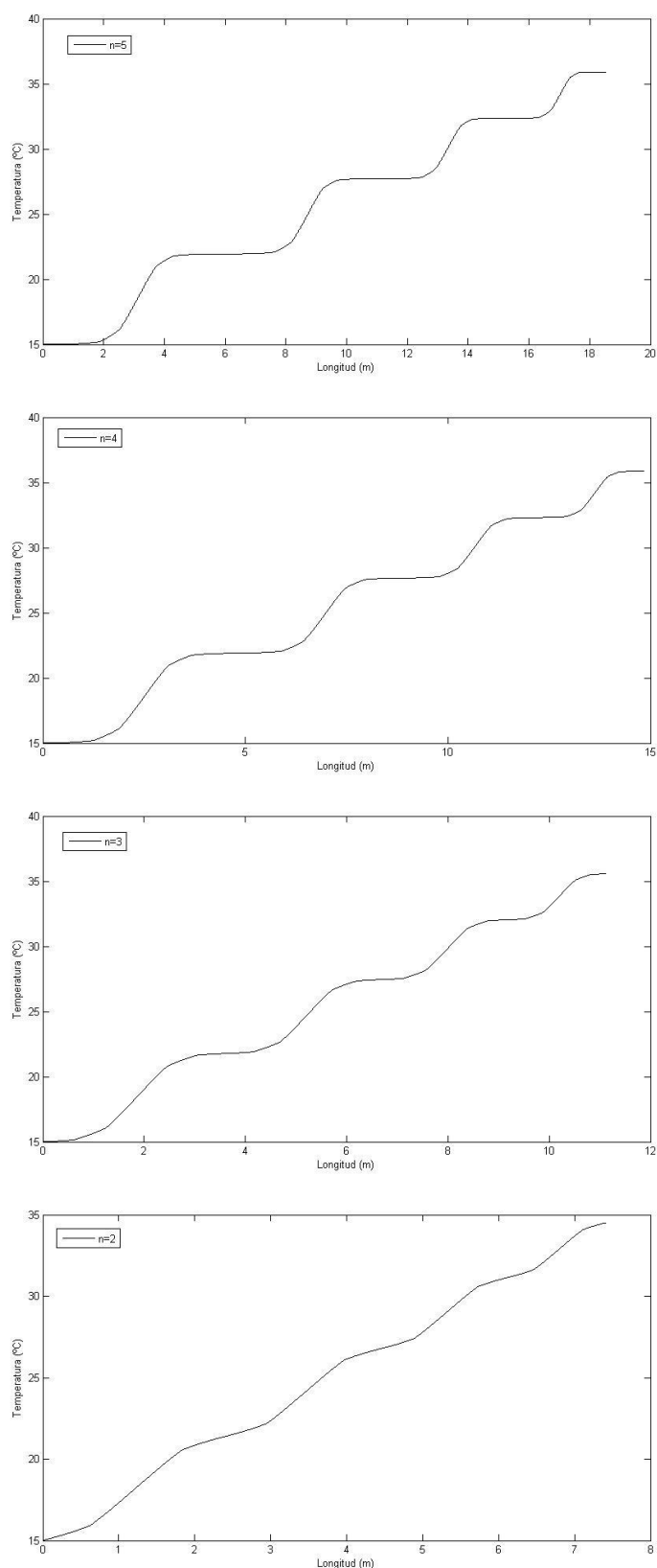
---

Vemos como en la ilustración 6.3 el mayor aumento de temperatura (cambio apreciable de color) se produce en las 4 primeras espiras, mientras que en el resto apenas hay cambio en la temperatura del agua (mismo color azul).

Para evitar construir un intercambiador con zonas del serpentín improductivas se parte de un número  $n$  de espiras por bobinado (en torno a 5 o 6) y se va reduciendo uno a uno, hasta que no se presenten zonas de temperatura constante en el gráfico Temperatura-Longitud.

Tal y como se observa en la ilustración 6.4, para  $n = 3$ , han desaparecido las zonas horizontales por completo. Si a partir de ahí se siguen reduciendo las espiras, la temperatura de salida disminuirá de forma apreciable. Así pues para las condiciones dadas la máxima temperatura de salida posible se conseguirá para  $n = 3$  y alargar el serpentín por encima de esto resultaría inútil ya que no se puede extraer más energía de los gases calientes. Este ajuste se realizará para el caudal de agua mínimo de trabajo, en nuestro caso, 2L/min.

La longitud final de tubo requerido será la longitud dada por el programa en MATLAB, más un extra de 1 metro para hacer las salidas y entradas al calentador, y los pasos de bobinado a bobinado, que no se tienen en cuenta en el programa. Para completar el intercambiador se le añadirán dos boquillas para adaptar la tubería de agua al tubo del serpentín como los que aparecen en la ilustración 6.5.



**Ilustración 6.4. Representación de la temperatura en función de la longitud del calentador, de arriba a abajo, para  $n=5$ , 4, 3 y 2. Fuente: Elaboración propia**

Altitud = 2500m  $V'_{ag} = 2\text{L/min}$ ,  $T_{inicial,ag} = 15^\circ\text{C}$ ,  $x_{air} = 0,1$   $T_{inicial,GPC} = 1000^\circ\text{C}$ ,  
 $V'_{bio} = 0,00040\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $l = 8$



*Ilustración 6.5. Adaptador para la manguera (izqda.) y serpentín utilizado en las pruebas (dcha.)*

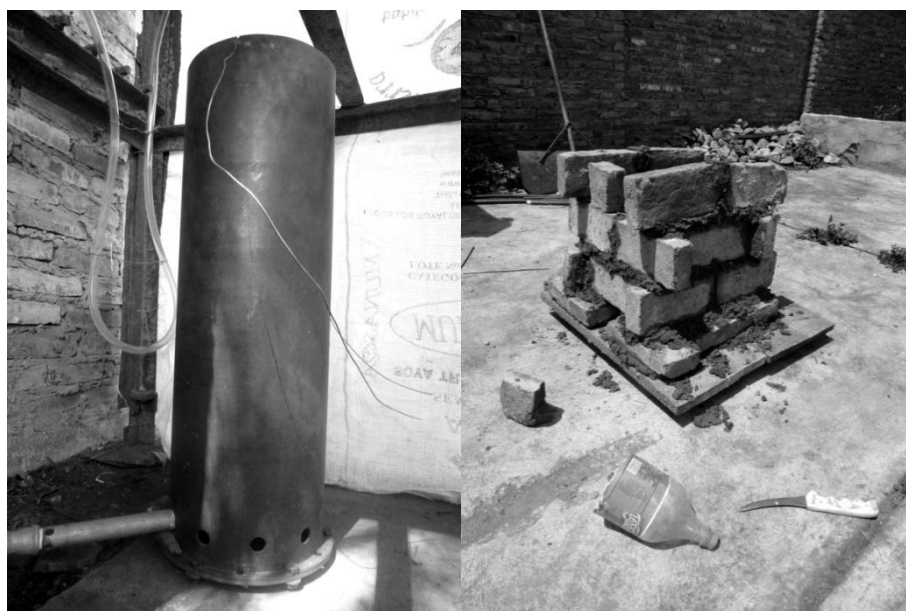
### 6.2.3. Diseño de la carcasa

Es el elemento encargado de aislar el serpentín y el quemador del medio externo, así como de soportar el resto de elementos. Está formado por una carcasa externa y una tapa metálica.

El diseño de la carcasa, parte, al igual que en el caso del intercambiador, de la elección del material. En este caso los requisitos son menos estrictos, con lo que se puede acceder a un gran número de materiales diferentes:

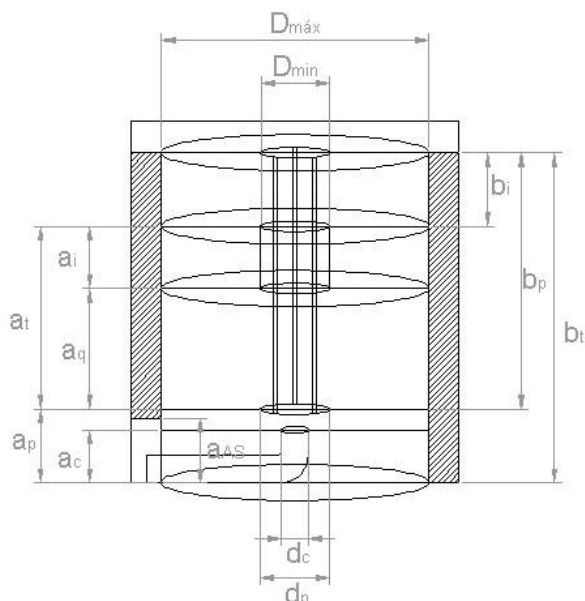
- Aislante térmico
- Capaz de soportar altas temperaturas. No ignífugo.
- Mecánicamente debe soportar el peso del resto de elementos
- Bajo coste, a poder ser gratis.

Los materiales más adecuados para este caso son los ladrillos de arcilla o adobe, aunque también se puede utilizar una lámina metálica enrollada en forma de tubo, (Ilustración 6.6) y rodeada de material aislante (paja, lana, etc.). Conviene mirar la tabla 3.4 que muestra diferentes materiales que pueden actuar como aislantes



*Ilustración 6.6. Carcasa construida con lámina metálica (sin aislar), (izqda.) y carcasa de ladrillo (dcha.)*

En definitiva, el diseño de la carcasa consiste en conformar una cámara como la que aparece en la ilustración 6.7. Se trata de un recinto cilíndrico, apoyado en el suelo, donde va alojado el intercambiador, con una apertura para el quemador. Por la parte superior está abierto y se cerrará con una tapa metálica perforada, de la que colgarán tanto el serpentín como el plato del quemador. A continuación se explica que significa cada cota señalada en la figura.



**Ilustración 6.7. Esquema de la carcasa y dimensiones básicas. Fuente: Elaboración propia**

- $a_i$ : longitud del intercambiador, viene dada una vez que implementamos el modelo en MATLAB
- $a_q$ : distancia entre el quemador (superficie superior del plato) y parte inferior del intercambiador. Está establecida por norma en 100 mm.
- $a_t$ : La suma de las dos cotas anteriores
- $a_p$ : Altura del plato respecto de la superficie suelo.

$$a_p - a_c = 3\text{cm} \quad (6.5)$$

- $a_c$ : Altura del cabezal del quemador respecto de la superficie suelo. Se tomará igual a 4 cm como norma general, aunque puede variar unos mm, en función del diámetro de cabezal utilizado.
- $a_{AS}$ : Altura de la apertura destinada a la entrada de aire secundario. Por esta apertura se introduce también el quemador en la cámara y sirve para encenderlo desde fuera. Deberá ser suficiente para poder introducir el inyector del quemador, y disponer de una altura extra (4-5 cm) para permitir el encendido externo del quemador.
- $d_c$ : Diámetro del plato utilizado. Queda definido por las dimensiones del intercambiador. Es igual a  $D_{\min}$ .
- $d_p$ : Diámetro del cabezal del quemador. Queda definido en el cálculo del quemador.
- $D_{\max}$ : Diámetro máximo del serpentín. Queda definido por las dimensiones del intercambiador.
- $D_{\min}$ : Diámetro mínimo del serpentín. Queda definido por las dimensiones del intercambiador.

A partir de estas cotas conocidas es posible calcular las requeridas para la construcción del modelo.

- $b_t$ : Es la altura total de la carcasa. Su valor quedará determinado por:

$$b_t = a_t + a_p + \Delta b \quad (6.6)$$

El término  $\Delta b$  positivo se añade debido a que dependiendo del material utilizado este puede tomar un valor u otro. El valor de  $\Delta b$  será entre un 10 y un 40% el valor de  $a_t + a_p$ .

- $b_p$ : Distancia desde la tapa a la que se cuelga el plato. Queda definido por:

$$b_p = b_t - a_p \quad (6.7)$$

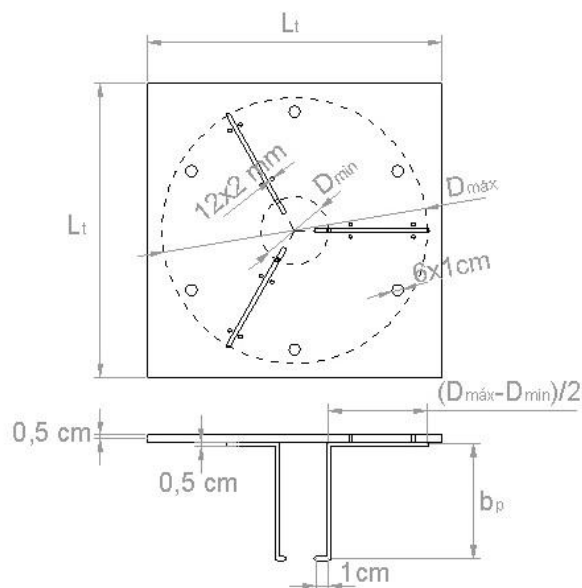
- $b_i$ : Distancia desde la tapa a la que se cuelga el intercambiador. Queda definido por:

$$b_i = b_t - (a_p + a_t) \quad (6.8)$$



Con estas cotas ya es posible construir la carcasa del calentador

Por otro lado es necesario diseñar la tapa que servirá como elemento de sujeción y guía tanto del plato como del intercambiador. Ilustración 6.8.



**Ilustración 6.8. Esquema de la tapa de la carcasa y dimensiones básicas. Fuente: Elaboración propia**

Consiste en una lámina metálica de pequeño espesor. Lo cierto es que cuanto más fina sea, más abarataremos los costes, no obstante, debe ser suficiente para soportar el peso del intercambiador y el plato sin doblarse. Las dimensiones para la plancha metálica serán las mínimas como para poder apoyarse en los laterales de la carcasa y se toma:

$$L_t = D_{m\acute{a}x} + 5cm \quad (6.9)$$

Ha esta plancha metálica se le mecanizarán los siguientes elementos:

- Soldadura de las tres barras de acero corrugado y diámetro 0,5-1 cm, que servirán como guía del serpentín y sujeción del plato. La longitud de estas barras vendrá dada por:

$$L_{bg} = \frac{D_{m\acute{a}x} - D_{m\acute{i}n}}{2} + b_p + 1cm \quad (6.10)$$

- Perforar un cierto número de agujeros (5-6) de diámetro 1 cm para facilitar la evacuación de humos
- Perforar un total de 12 agujeros de pequeño diámetro (2mm), dos a cada lado de cada una de las barras para introducir los alambres que soportarán el intercambiador.

## 6.3. Materiales y construcción

A modo de resumen se agrupan todos los elementos necesarios para la construcción de un calentador en la tabla 6.2:

Como se comprueba, existen ciertos elementos cuyas dimensiones se desconocen, y para cuyo cálculo es necesaria la aplicación del modelo en MATLAB.

El proceso para fabricar el calentador es el que sigue:

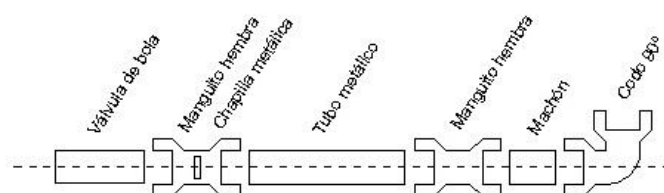
- Valoración del área geográfica, recursos energéticos y requerimientos.
- Implementación del problema en MATLAB.
  - Cálculo de las dimensiones del quemador a construir a través del programa en MATLAB indicado. Obtenemos los parámetros:  $d_o$ : Diámetro del orificio del inyector,  $d_g$ : Diámetro interno de la garganta o tubo de mezcla,  $L_g$ : Longitud de la garganta o tubo de mezcla,  $d_l$ : Diámetro de las lumbreras,  $d_c$ : Diámetro interno de salida de gases del cabezal, así como el exceso de aire aportado  $x_{air}$

- Optimización del serpentín tal y como se indica en el punto 6.2.2. Obtenemos el diámetro del tubo  $d_e$ , longitud  $L_i$  y configuración geométrica (número de bobinas y de espiras por bobina). También calculamos los diámetros de cada bobinado, los diámetros máximos  $D_{máx}$  y mínimo  $D_{mín}$ , y la altura del intercambiador  $a_i$ . Las temperaturas de salida para los caudales de uso nos darán una idea de las temperaturas máximas que podremos obtener.

	Cantidad
Quemador	Tubo metálico $d_g$ $L_g$
	Manguito hembra metálico $\frac{1}{2}' - d_g$ 1 uds.
	Codo 90° metálico hembra $d_g - d_q$ 1 uds.
	Válvula de bola hembra $\frac{1}{2}' - \frac{1}{2}'$ 1 uds.
	Chapita metálica $\frac{3}{4}'$ 1 uds.
	Plato cerámico $d_p$ 1 uds.
Intercambiador	Tubo intercambiador $d_e$ $L_i$
	Adaptador serpentín manguera 2 uds.
Carcasa	Ladrillos de arcilla o adobe <sup>2</sup> -
	Cemento o arcilla -
	Plancha metálica, $L_t \times L_t$ 1 uds
	Barra acero corrugado <sup>2</sup> $3 \cdot L_{bg} [m]$

**Tabla 6.2. Materiales necesarios para la construcción del calentador. Fuente: Elaboración propia**

- Obtenemos el resto de parámetros a partir de los datos dados por el modelo para la carcasa.
- Valoración económica. Una vez se tienen los datos de cada uno de los elementos a utilizar se calcula el precio de cada uno de ellos y se suma el total. El precio obtenido será el precio final del calentador, a falta de la mano de obra requerida para la mecanización de algunos elementos. A partir del precio estimado, y las temperaturas máximas dadas por el modelo, se valora si sale rentable su construcción o no. En caso negativo habrá que modificar los parámetros iniciales (recursos energéticos y requerimientos).
- Construcción del inyector conforme a los planos del ANEXO C pero con las nuevas dimensiones obtenidas por el modelo.
  - Perforación de la chapilla metálica un orificio de  $d_0$ .
  - Empotramiento de la chapilla en el interior de uno de los manguitos metálicos. Si la chapilla no se mantiene será necesaria soldarla al manguito.
  - Perforación de las lumbreras en el tubo metálico de  $d_g$  con las medidas que obtenemos del modelo y mecanizado de las roscas externas a cada uno de los lados del tubo.
  - Unión del conjunto utilizando cinta de teflón en cada una de las roscas macho para evitar fugas de gas. ilustración 6.9. Hay que tener en cuenta que este montaje cuenta con un machón y un manguito extra que se utilizaba para facilitar el cambio de cabezal en las pruebas pero que no son necesarios. y se puede montar directamente el codo con el tubo de mezcla



**Ilustración 6.9. Montaje del conjunto del quemador utilizado en las pruebas. Fuente: Elaboración propia**

- Construcción del intercambiador. Se requerirá para su construcción un tablero de madera cuadrado de lado al menos  $L_t$  y alrededor de 30 clavos de longitud 5 cm o más.
  - Se traza un círculo de radio 10 cm sobre el tablero. Posteriormente se traza una línea desde el centro hasta el exterior. Sobre esta línea se marcan los siguientes radios  $r'_i$  para cada bobinado:

$$r'_i = r_i - \frac{d_e}{2} \quad (6.11)$$

Siendo  $r_i$  el radio de cada bobinado dado por el modelo.

- Se traza círculos concéntricos desde el centro, por los radios marcados en el tablero.
- Se clavan los clavos siguiendo el círculo marcado más interno.
- Se arrolla el tubo alrededor de los clavos formando el bobinado más interno. Hay que tener en cuenta que hay que dejar alrededor de 30 cm de tubo para sacar el agua al exterior y además si este tubo que va al exterior sale desde la parte inferior de la bobina o desde la superior. Si el número de bobinados es par, saldrá desde arriba, y si es impar desde abajo.
- Una vez tenemos el primer bobinado, desclavamos los clavos y formamos con ellos otro círculo similar pero para el radio siguiente. Hay que tener en cuenta que hay que dar el número de vueltas completa (una vuelta completa empieza y acaba en el mismo clavo).
- Arrollamos un nuevo bobinado para este nuevo radio, teniendo en cuenta que si el primero ha ido de arriba abajo, este irá de abajo a arriba, y viceversa.
- El intercambiador está completo cuando se hacen los bobinados para todos los radios.
- Una vez finalizado se sacan los extremos de los tubos por la parte superior.

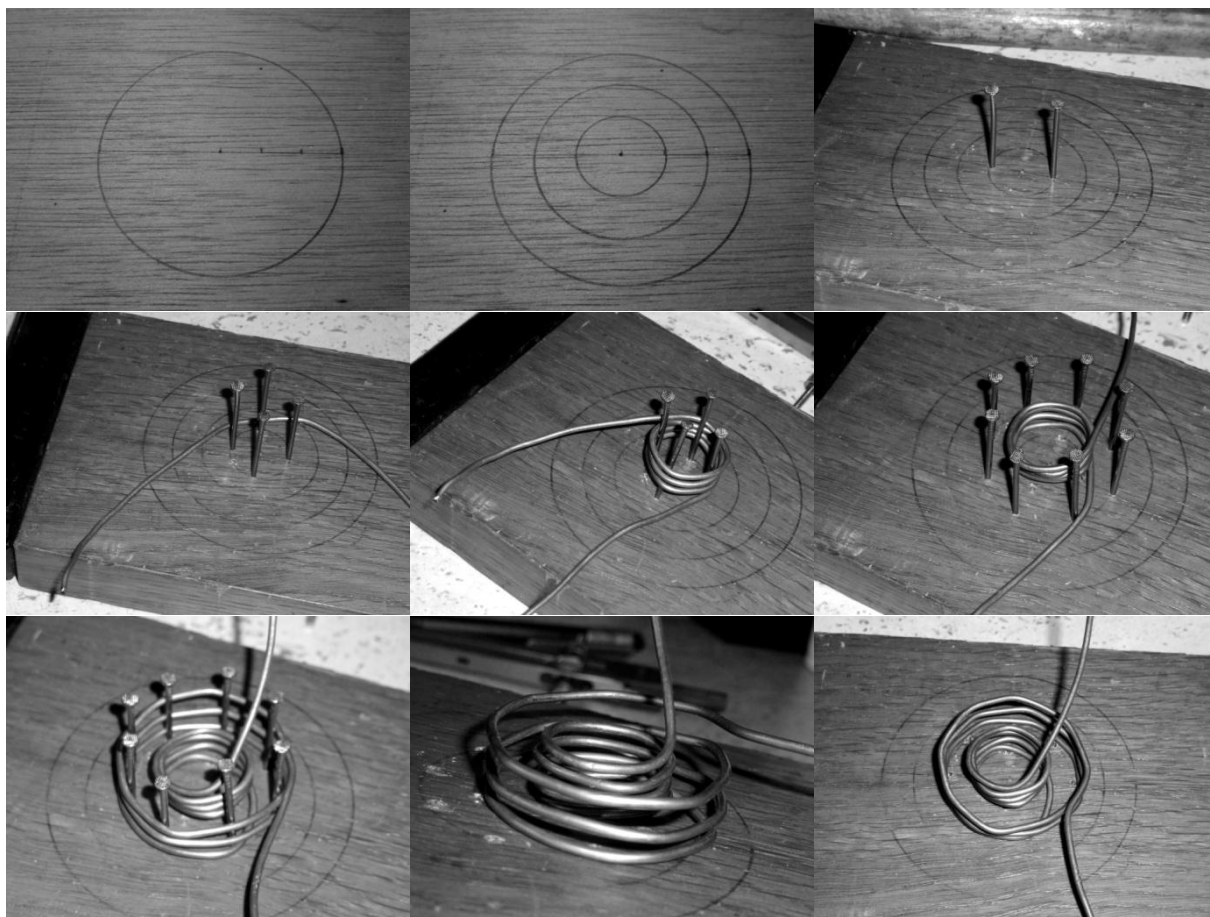
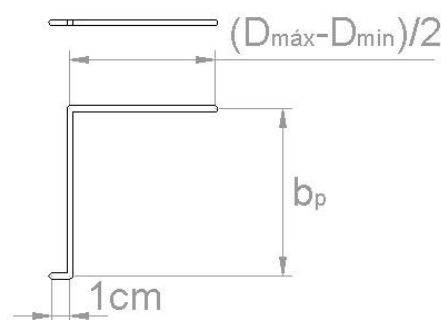


Ilustración 6.10. Proceso de conformado del serpentín ( $n=3$ ,  $l=2$ ). Fuente: Elaboración propia



- Construcción de la carcasa. A partir de ladrillos y cemento o arcilla, aunque como se ha comentado se pueden utilizar otros materiales.
  - La carcasa se construirá sobre un suelo liso y estable.
  - Se colocará el intercambiador sobre el suelo, y se trazará una línea a su alrededor.
  - Se construirá la carcasa circunscribiendo el círculo trazado, y dejando un pequeño hueco en uno de los laterales, en la primera fila de ladrillos para que pase el quemador. Es conveniente que la primera fila de ladrillos vaya ligeramente enterrada.
  - Se rellenarán las esquinas vacías con cemento o arcilla hasta conformar una cámara cilíndrica de radio suficiente para que quepa el intercambiador.
- Construcción de la tapa. A partir de la plancha metálica y la barra de acero corrugado.
  - Se cortará la barra de acero corrugado en tres longitudes iguales y se doblará en ángulos de 90° conformando las barras mostradas en la ilustración 6.11
  - Se mecanizarán los agujeros tanto de sujeción del serpentín, como de evacuación de humos, en la plancha metálica en los lugares indicados por la ilustración 6.8.
  - Se soldarán estas barras a la plancha metálica formando un círculo y equistantes entre ellas.



**Ilustración 6.11. Forma y dimensiones generales de las barras guía. Fuente: Elaboración propia**

- Montaje del conjunto.
  - Primeramente se introducirá el intercambiador entre las barras guía de la tapa. Luego mediante unos alambres se colgará a la altura deseada. Se colocará el plato en el extremo inferior de las barras de sujeción.
  - Se introducirá el quemador en la carcasa y se fijará con tacos de madera o piedras de forma que quede fijo y el cabezal se encuentre bien centrado y horizontal en la cámara cilíndrica.
  - Se colocará la tapa del calentador del que cuelgan el serpentín y el plato, y se sacarán los tubos del intercambiador al exterior por alguno de los agujeros existentes en la tapa. Si sobra mucho tubo se cortará, cuanto menos se exponga el serpentín de cobre al medio externo mejor. Una vez ajustado esto se colocarán en sus extremos los adaptadores a la manguera.
  - Por último se realizarán las conexiones de agua y gas envolviendo todos los extremos en cinta de teflón para evitar fugas.

## 6.4. Ejemplo y coste aproximado

En este apartado se van a seguir los primeros pasos establecidos para la construcción de un calentador de biogás del apartado anterior aplicándolos a dos casos prácticos de forma que podremos calcular las dimensiones y costes aproximados para dos escenarios reales y facilitar su comprensión.

Como ejemplo nos servirán los escenarios propuestos al inicio del trabajo en el punto 1.6, con los que se plantea el problema: uno para el altiplano Boliviano, y otro para la región subandina. Aquellos parámetros desconocidos se supondrán, correspondiéndose en mayor o menor medida con la realidad, ya que la finalidad de este apartado es el dar un valor numérico y económico a todo lo explicado anteriormente.

- Valoración geográfica recursos energéticos y requerimientos

	E1. Altiplano	E2. Región subandina
Altitud, $Altitud[m]$	3600	2500
Temperatura del aire, $T_{air}[^{\circ}C]$	10	25
Temperatura del agua, $T_{inicial,ag}[^{\circ}C]$	15	19
Biogás diario disponible, $V_{bio}[L]$	500	600
Temperatura del biogás, $T_{bio}[^{\circ}C]$	10	25
Composición del biogás $\%CH_4$	55	60
Requerimientos energéticos, $t[min]$	20	40

**Tabla 6.3. Valoración económica y recursos energéticos del escenario 1 y 2. Fuente: Elaboración propia**

A partir de estos datos calculamos el caudal de biogás del que se dispone utilizando la ecuación 6.2

	E1. Altiplano	E2. Región subandina
Caudal de biogás, $V'_{bio}[m^3/s]$	0,00042	0,00025

**Tabla 6.4. Caudales de trabajo del escenario 1 y 2. Fuente: Elaboración propia**

- Implementación de los modelos en MATLAB

Primeramente implementamos el programa relativo al cálculo del calentador. Los resultados que nos interesan para la construcción del quemador al introducir las variables de la tabla 6.3, aparecen en la siguiente tabla (tabla 6.5 y 6.6).

E1. Altiplano			
	Exacto	Real	Unidad
Diámetro del orificio del inyector	3,38	3	mm
Diámetro de la garganta	23,00	25,4 (1')	mm
Longitud de la garganta	254	254	mm
Diámetro de las lumbreras	12,70	13	mm
Área total de la garganta	-	0,000507	m <sup>2</sup>
Área total de absorción	-	0,000531	m <sup>2</sup>
Cabezal del quemador		25,4(1')	mm
Exceso de aire real		0,27	-

**Tabla 6.5. Parámetros constructivos del quemador para el Escenario 1. Fuente: Elaboración propia**

E2. Región subandina			
	Exacto	Real	Unidad
Diámetro del orificio del inyector	2,63	3	mm
Diámetro de la garganta	24,41	25,4 (1')	mm
Longitud de la garganta	254	254	mm
Diámetro de las lumbreras	12,70	13	mm
Área total de la garganta	-	0,000507	m <sup>2</sup>
Área total de absorción	-	0,000531	m <sup>2</sup>
Cabezal del quemador		19,09 (¾')	mm
Exceso de aire real		0,19	

**Tabla 6.6. Parámetros constructivos del quemador para el Escenario 2. Fuente: Elaboración propia**

Después de esto se implementa el modelo en MATLAB para el intercambiador. Sin embargo, este problema requiere de la introducción de más variables relativas a las propiedades y distribución de los tubos. Para los ejemplos vamos a suponer que para el escenario 1, se consigue en el mercado un tubo de diámetro externo de 5 mm y 4 para el interno. Y para el escenario 2 únicamente disponemos de un tubo de 7 y 6 mm de diámetro externo e interno respectivamente. Ambos tubos de cobre.

	E1. Altipano	E2. Región subandina
Diámetro interno, $d_i$ [mm]	4	6
Diámetro externo, $d_e$ [mm]	5	7

**Tabla 6.7. Diámetros interno y externo disponibles para los escenarios 1 y 2. Fuente: Elaboración propia**

Dados los criterios de diseño descritos (ecuaciones 6.3 y 6.4) obtenemos el resto de parámetros necesarios para completar el modelo. De la tabla 6.1 obtenemos el número máximo de bobinados concéntricos para los diámetros establecidos en los dos escenarios. Y por último acudimos a la bibliografía para obtener las propiedades térmicas para el material del tubo,  $k$  y  $\varepsilon$ , que en nuestro caso es el cobre.

	E1. Altipano	E2. Región subandina
Separación transversal, $S_T$ [mm]	7,5	6
Separación longitudinal, $S_L$ [mm]	7,5	7
Diámetro máximo $D_{max}$ [mm]	200	200
Nº máximo de bobinados $l_{max}$	11	8
Conductividad térmica $k$ [W/m°C]	385	385
Emisividad $\varepsilon$	0,78	0,78

**Tabla 6.8. Variables extra a introducir en el modelo en MATLAB del intercambiador para los escenarios 1 y 2. Elaboración propia**

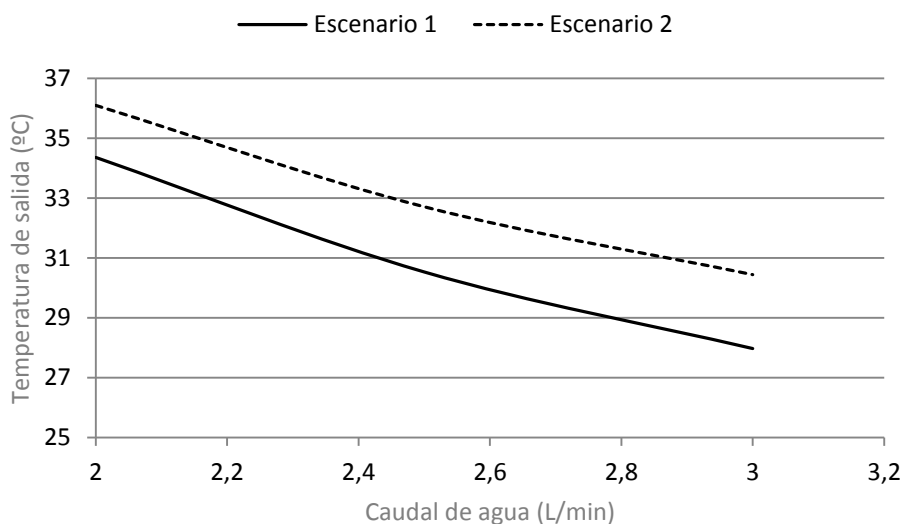
Con los datos anteriores estamos en disposición de complementar y ajustar el número de espiras por bobinado para un caudal de agua mínimo de 2L/min en el modelo en MATLAB. Para los escenarios 1 y 2, el número de espiras por bobina se establece en 3. En la tabla 6.9 aparecen los resultados de la optimización de los serpentines para ambos escenarios.

Dado que a la longitud dada por el modelo hay que sumarle al menos un metro para realizar las conexiones entre los bobinados concéntricos, así como para sacar el agua al exterior del calentador, la longitud total requerida de tubo será aproximadamente de 14 m para el escenario 1 y 10,5 metros

para el escenario 2. Es necesario comprobar para diferentes caudales la temperatura de salida del intercambiador (ilustración 6.12).

	E1. Altipano	E2. Región subbandina
Longitud intercambiador, $L[m]$	12,96	9,54
$D_{m\acute{a}x}[m]$	0,200	0,200
$D_{m\acute{i}n}[m]$	0,050	0,053
$a_i[m]$	0,023	0,032
$r_1[m]$	0,100	0,100
$r_2[m]$	0,093	0,090
$r_3[m]$	0,085	0,080
$r_4[m]$	0,078	0,069
$r_5[m]$	0,070	0,058
$r_6[m]$	0,063	0,048
$r_7[m]$	0,055	0,037
$r_8[m]$	0,048	0,027
$r_9[m]$	0,040	-
$r_{10}[m]$	0,033	-
$r_{11}[m]$	0,025	-
Temperatura (2 L/min), $T_{final,ag}[^{\circ}C]$	34,36	36,10
Temperatura (2,5 L/min), $T_{final,ag}[^{\circ}C]$	30,53	32,71
Temperatura (3 L/min), $T_{final,ag}[^{\circ}C]$	27,97	30,44

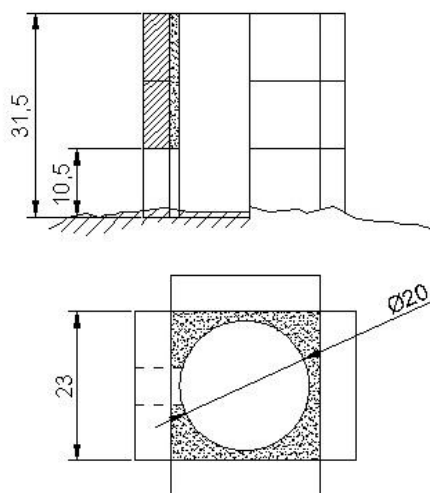
**Tabla 6.9. Parámetros de salida del modelo de intercambiador para los escenarios 1 y 2. Fuente: Elaboración propia**



**Ilustración 6.12. Temperaturas de salida del agua del calentador para diferentes caudales para los escenarios 1 y 2. Fuente: Elaboración propia**

- Obtenemos el resto de parámetros a partir de los datos dados por el modelo

Se calculan las dimensiones de la carcasa para cada uno de los intercambiadores propuestos. Para este caso particular, supondremos que disponemos de ladrillos de arcilla de dimensiones  $10,5 \times 23 \times 5,5$  cm. Se colocarán de canto formando una chimenea de base cuadrada. Para crear la cámara cilíndrica se rellenan las esquinas con arcilla o cemento tal y como se muestra en la ilustración 6.13.



**Ilustración 6.13. Esquema de construcción de la carcasa a partir de ladrillos. Fuente: Elaboración propia**

	E1. Altipano	E2. Región subandina
Altura total , $a_t[m]$	0,123	0,132
Altura del plato , $a_p[m]$	0,070	0,070
Altura de apertura para AS, $a_{AS}[m]$	0,105 <sup>32</sup>	0,105
Diámetro del plato, $d_p[m]$	0,050	0,053

**Tabla 6.10. Parámetros de partida para la construcción de la carcasa. Fuente: Elaboración propia**

Calculamos primero la altura mínima que debería tener la carcasa:

	E1. Altipano	E2. Región subandina
Altura mínima , $a_t + a_p[m]$	0,193	0,202

**Tabla 6.11. Altura mínima del intercambiador para los escenarios 1 y 2. Fuente: Elaboración propia**

Como podemos observar, esta altura no se alcanza si colocamos dos alturas de ladrillos, por lo que se añade una tercera. Así  $b_t$  y el resto de parámetros estarán determinados por la altura de los tres ladrillos puestos de canto (ecuaciones 6.6, 6.7 y 6.8).

	E1. Altipano	E2. Región subandina
Altura de la carcasa , $b_t[m]$	0,315	0,315
Distancia tapa-plato, $b_p[m]$	0,245	0,245
Distancia tapa-intercambiador, $b_i[m]$	0,105	0,105

**Tabla 6.12. Distancias relativas a la carcasa para los escenarios 1 y 2. Fuente: Elaboración propia**

Por último calculamos las dimensiones de la tapa metálica cuadrada y las barras guía:

	E1. Altipano	E2. Región subandina
Lado tapa , $L_t[m]$	0,250	0,250
Longitud barra guía, $L_{bg}[m]$	0,330	0,328

**Tabla 6.13. Dimensiones requeridas para la tapa para los escenarios 1 y 2. Fuente: Elaboración propia**

<sup>32</sup> Dado que utilizamos ladrillos, al colocarlos de canto su altura es de 10,5 cm

- Valoración económica

Con ello se pretende obtener un presupuesto aproximado antes de construir los modelos. Una vez que tenemos los datos de cada elemento se busca el precio por unidad, multiplicamos por el número de unidades. Finalmente obtenemos coste total sumando todo.

Este es el precio que se tendrá en cuenta para valorar la factibilidad del calentador. Los precios se dan en Bolivianos. Se añade la mano de obra remunerada necesaria para la mecanización de cada elemento.

Escenario 1		Cantidad	Bs/ud <sup>33</sup>	Bs.
Quemador	Tubo metálico 1'	25 cm	150 Bs/m	30
	Manguito hembra metálico ½'- 1'	1 uds.	7 Bs/ud	7
	Codo 90° metálico hembra 1' - 1'	1 uds.	7 Bs/ud	7
	Válvula de bola hembra ½' - ½'	1 uds.	10 Bs/ud	10
	Chapita metálica ¾'	1 uds.	0	0
	Plato cerámico	1 uds.	2 Bs/ud	2
	Mano de obra	10 min.	100 Bs/h	15
Intercambiador	Tubo intercambiador, 5 mm.	14 m.	15 Bs/m	210
	Adaptador serpentín manguera	2 uds.	5 Bs	10
	Mano de obra	0 min.	0	0
Carcasa	Ladrillos de arcilla o adobe	-	0	0
	Cemento o arcilla	-	0	0
	Plancha metálica, 0,250 × 0,250	1 uds	450 Bs/m <sup>2</sup>	30
	Barra acero corrugado 50 mm.	1 m.	10 Bs/m	10
	Mano de obra	20 min.	100 Bs/h	30
Coste total				361

**Tabla 6.14. Costes para el calentador del escenario 1. Fuente: Elaboración propia**

Escenario 2		Cantidad	Bs/ud	Bs.
Quemador	Tubo metálico 1'	25 cm	150 Bs/m	30
	Manguito hembra metálico ½'- 1'	1 uds.	7 Bs/ud	7
	Codo 90° metálico hembra 1' - ¾'	1 uds.	6 Bs/ud	6
	Válvula de bola hembra ½' - ½'	1 uds.	10 Bs/ud	10
	Chapita metálica ¾'	1 uds.	0	0
	Plato cerámico	1 uds.	2 Bs/ud	2
	Mano de obra	10 min.	100 Bs/h	15
Intercambiador	Tubo intercambiador, 7 mm.	10,5 m.	22 Bs/m	231
	Adaptador serpentín manguera	2 uds.	5 Bs	10
	Mano de obra	0 min.	0	0
Carcasa	Ladrillos de arcilla o adobe	-	0	0
	Cemento o arcilla	-	0	0
	Plancha metálica, 0,250 × 0,250	1 uds	450 Bs/m <sup>2</sup>	30
	Barra acero corrugado 50 mm.	1 m.	10 Bs/m	10
	Mano de obra	20 min.	100 Bs/h	30
Coste total				381

**Tabla 6.15. Costes para el calentador del escenario 2. Fuente: Elaboración propia**

<sup>33</sup> Los precios señalados son aquellos por los que se pagó o interesó en la construcción del calentador para las pruebas experimentales de este trabajo. No obstante los precios en Bolivia dependen del lugar de compra, y en muchos casos, de la capacidad de regateo, por ello deben tomarse como meramente orientativos

Los precios obtenidos son aproximados, pero necesarios para hacer una valoración previa acerca de si sale rentable construir el calentador o no.

El criterio de valoración depende de cada caso particular, pero en principio se ha de valorar si las temperaturas de salida para los caudales de trabajo resultan satisfactorias. Conviene una vez se tiene definida la geometría del calentador alterar parámetros tales como el biogás consumido, los caudales de agua, la temperatura inicial del agua etc. para prever como se va a comportar el calentador diseñado.

Si los resultados son aceptables se valora el coste. Si este es excesivo, conviene modificar el calentador para trabajar con mayores cantidades de biogás, o buscar tubos para el intercambiador más baratos y probar que tal actúan en el modelo, ya que es lo que realmente encarece el producto.

Cuando se da el visto positivo tanto a los resultados como al precio se procede a su construcción.

## 6.5. Instalación y uso

El punto que sigue detalla la información adicional necesaria una vez que se ha decidido construir el calentador. Acerca de su localización, su uso y mantenimiento.

### 6.5.1. Localización del calentador

A la hora seleccionar el lugar para construir el calentador es necesario tener en cuenta algunos puntos.

- Evitar pérdidas de calor innecesarias. El calentador es un aparato en el que se quema una cierta cantidad de combustible para calentar un fluido. Los gases en su interior alcanzan temperaturas altas, por lo que cuanto menor sea la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior, menores serán las pérdidas de calor. Por ello, para su localización, es importante buscar un lugar lo más cálido y soleado posible dentro de las posibilidades. Sin embargo quizá el factor más importante es el viento, ya que aumenta el efecto convectivo y con ello las pérdidas de calor. Además dependiendo de la orientación del calentador y la dirección del viento, el aire puede entrar con fuerza por la apertura inferior llegando a apagar la llama. El calentador se habrá de construir en el lugar más resguardado del viento posible, y además buscando una protección extra para el lateral por donde entra el quemador.
- Facilitar la evacuación de humos. La combustión del biogás genera gases que pueden llegar a ser nocivos para el ser humano. Aunque se ha diseñado el inyector para aportar el aire necesario para que la combustión sea completa, en los productos siempre existirá una pequeña cantidad de monóxido de carbono, que es tóxico. El resto de gases,  $\text{CO}_2$ , el vapor de agua y los restos de  $\text{CH}_4$  no quemado no resultan tóxicos, pero pueden llegar a desplazar el oxígeno de una habitación poco ventilada. Por todo ello es indispensable que el calentador se sitúe preferiblemente en el exterior, y de no ser así, colocarlo en un lugar poco transitado por las personas y diseñar un sistema (chimenea) que evacúe los humos al exterior.
- Minimizar la distancia al lugar de utilización. Una vez que la tubería de agua caliente sale del interior del calentador la dirección de transmisión de calor se invierte, y cuando en el interior era desde los gases hacia el agua, ya que los primeros estaban más calientes, en el exterior la transferencia tiene lugar desde el agua al aire que lo rodea, que está más frío. Esto se traduce en que cuanto mayor sea la longitud que tenga que recorrer el agua caliente por el exterior, menor será la temperatura útil del agua. Para minimizar esta caída de temperatura es necesario tomar dos medidas. En primer lugar, construir el calentador lo más cerca posible del lugar donde se vaya a dar uso a esa agua, sea una ducha o un grifo. Y en segundo, aislar en la medida de lo posible la tubería que saca el agua del calentador y lo lleva hasta el lugar de uso. Para ello, se utilizará una tubería de plástico o PVC (menor conductividad térmica que el metal) envuelta con algún tipo de aislante (lana, paja, etc.).

Teniendo en cuenta estos tres parámetros se localizará la zona en la que se optimicen los tres parámetros. En la tabla 6.16 aparece un resumen de todos ellos y las posibles soluciones.

Factor	Lugar ideal	Solución
Temperaturas	Lugar templado y soleado	Aislar más la carcasa del calentador
Viento	Lugar sin viento	Crear un parapeto que desvíe el aire
Humos	Lugar bien ventilado	Construcción de chimenea
Distancia	Lugar cercano al grifo o ducha	Aislar la tubería de transporte de agua caliente

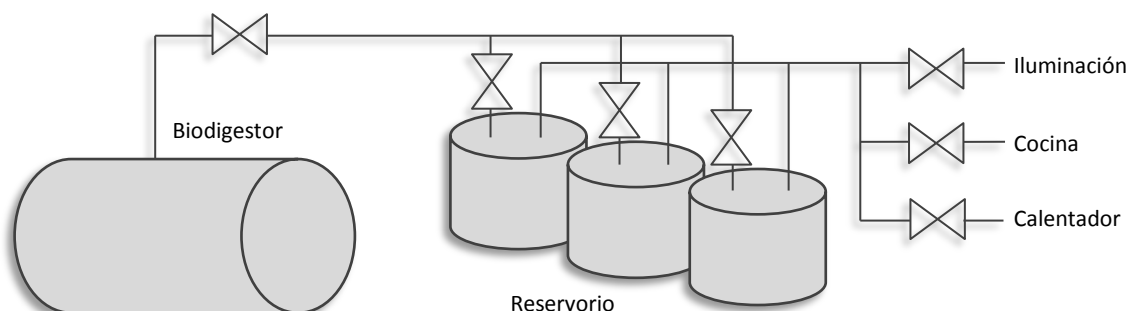
**Tabla 6.16. Lugar ideal del calentador para diferentes factores, y solución en caso de no encontrar lugar ideal. Fuente: Elaboración propia**

### 6.5.2. Reservorio de biogás y uso

Para la utilización del calentador con un caudal de combustible determinado es indispensable la utilización de un reservorio de biogás intermedio entre el biodigestor y el calentador.

El gas se genera en el interior del biodigestor de forma intermitente, ya que su producción es muy dependiente de factores externos tales como la temperatura, la radiación solar o la cantidad de materia orgánica introducida, variables todos ellos a lo largo del día. Su utilización directa resulta poco práctica porque sus usos en cocina, producción de agua caliente o luz, estarían limitados a las horas de mayor producción. El reservorio intermedio actúa por tanto como un regulador de caudal, suministrando la cantidad requerida en el momento deseado.

Así pues, la instalación de un biodigestor, implica siempre el uso de un reservorio, de lo contrario el uso del biogás resultaría ineficiente.



**Ilustración 6.14. Colocación de varios reservorios intermedios y distribución de gas. Fuente: Elaboración propia**

La utilización de uno o varios reservorios intermedios responde a las necesidades individuales de uso y producción. Un mayor número de depósitos da mayor flexibilidad sin embargo resulta más caro.

En primer lugar la capacidad total de almacenamiento, (la del depósito disponible, o la suma de todos en el caso de disponer de varios), debe ser suficiente para almacenar toda la producción de biogás pero teniendo en cuenta los gastos diarios que se tendrán del combustible.

Y por otro lado, cada depósito individual, deberá tener capacidad suficiente para suministrar el caudal deseado durante el tiempo requerido. Esta capacidad,  $V_{\text{reservorio}} [m^3]$  vendrá dada por tanto como:

$$V_{\text{reservorio}} [m^3] = V'_{\text{bio}} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot t[s] \quad (6.12)$$

Donde  $V'_{\text{bio}}$  es el caudal de biogás necesario y  $t$  el tiempo durante el cual se va a requerir ese caudal.

Por ejemplo, en el caso particular que nos interesa para el calentador, el tiempo requerido serán alrededor de 10 min. Este es el tiempo necesario para darse una ducha. El caudal de biogás queda determinado para cada caso particular. Así por ejemplo, si el caudal para el que se ha calculado el calentador son  $0,00030 m^3/s$ , el volumen del reservorio debería ser:

$$V_{\text{reservorio}} [m^3] = 0,00030 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot 10[min] \frac{60[s]}{1[min]} = 0,180$$

Por lo que se requerirá al menos un depósito de 180 litros.



En el caso práctico, este reservorio suele ser un globo conformado con dos telas y termosellado en los laterales como el que aparece en la Ilustración 6.15. Y el control del caudal se hace colocando una cierta masa encima. Esta masa deberá ser calibrada para cada caso particular, de forma que obtengamos el mismo caudal deseado siempre.



**Ilustración 6.15. Depósito de biogás utilizado en las pruebas**

Este sistema de almacenamiento y utilización del biogás tiene como ventaja que resulta muy barato y simple, sin embargo también tiene su limitación. El hecho de utilizar una masa constante sobre un depósito que va perdiendo volumen continuamente hace que el caudal vaya disminuyendo poco a poco.

En la ilustración 5.10 del apartado experimental, aparecen los resultados del caudal instantáneo que resultaron de algunas pruebas realizadas para este trabajo para diferentes masas colocadas sobre el depósito. El reservorio utilizado en este caso era de alrededor de 400 litros.

A la hora de calcular un reservorio de estas características conviene tener en cuenta que si el depósito está casi vacío, el caudal será nulo, aun cuando quede algo de biogás en el interior. Por ello es necesario que exista siempre un cierto volumen de biogás extra de forma que el caudal no resulte nunca demasiado bajo. Así pues el volumen que ha de tener el depósito de estas características,  $V_{reservorio,g} [m^3]$ , vendrá dado por:

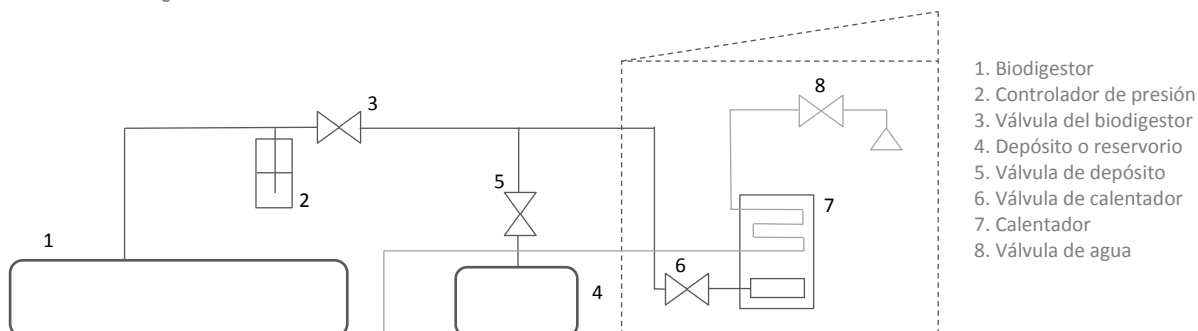
$$V_{reservorio,g} [m^3] = 3 \cdot V'_{bio} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot t [s] \quad (6.13)$$

Lo que indica que el depósito almacenará tres veces más del biogás requerido para un uso particular. Para el problema del calentador anterior:

$$V_{reservorio} [m^3] = 3 \cdot 0,00030 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot 10 [min] \frac{60 [s]}{1 [min]} = 0,540$$

Por lo que se necesitará un depósito de al menos 540 litros de capacidad.

Como se ha comentado, la masa será calibrada de forma que la curva de caudal instantáneo obtenida sea lo más próxima posible al caudal medio deseado. La instalación mínima para utilizar un calentador de biogás se muestra en la ilustración 6.16.



**Ilustración 6.16. Esquema del montaje para utilizar el calentador de biogás. Fuente: Elaboración propia**

La metodología para usar el calentador de agua se resume en los siguientes pasos.

- Una vez que el biodigestor (1) llene de biogás el reservorio (4), se puede proceder a utilizar el calentador. El depósito se considerará lleno cuando la presión en su interior supere la de la columna de agua (10 cm) del controlador de presión (2). En este estado se cierra la válvula del biodigestor (3). Lo ideal en este caso sería disponer de un reservorio secundario de forma que el biogás continúe acumulándose, ya que de lo contrario se perderá al exterior a través del controlador de presión.
- Se abriría la válvula de paso de agua (8) y se dejaría correr el agua.
- Posteriormente se colocaría la masa calibrada sobre el reservorio de biogás, se abriría la válvula del calentador (7) y se encendería por medio de una vela o cualquier otro instrumento que nos permita introducir una llama al quemador del calentador sin peligro. Es importante no encender el calentador si no circula agua por su interior como se explicará en el punto siguiente.
- Una vez encendido el agua comenzará a salir caliente en unos instantes, y la temperatura se regulará con la llave de paso de agua. A mayor caudal el agua saldrá más fría y cuanto menor sea, más caliente.
- Cuando se haya finalizado la tarea se cierra la válvula del calentador primero, y después se corta el agua. Para volver a llenar el reservorio se quita la masa de encima y se abre la válvula del biodigestor.

Para obtener una temperatura constante, se hará necesario ir reduciendo paulatinamente el caudal de agua, ya que, como se ha comentado, el biogás que sale del depósito cuando la masa es constante ira disminuyendo. Un mismo reservorio podrá utilizarse así mismo para distintas aplicaciones, lo único que habrá que variar será la masa a colocar, si se quieren conseguir caudales específicos para cada uso.

### 6.5.3. Recomendaciones y mantenimiento

A la hora de utilizar el calentador conviene tener en cuenta diferentes pautas para alargar al máximo su vida útil.

- No se debe encender el calentador si por el interior del serpentín no existe agua en circulación. El agua en movimiento evita que la temperatura del tubo alcance temperaturas muy altas, si por su interior solamente circula aire, la temperatura del tubo ascenderá por encima de los límites permisibles provocando daños. Por otro lado si existe agua, pero esta no se encuentra en movimiento, se calentará muy rápido, generando burbujas de vapor en poco tiempo, y provocando sobrepresiones en el serpentín.
- No se recomienda trabajar con caudales de agua mayores de 3 L/min. En primer lugar, porque probablemente no se consiga un aumento de temperatura satisfactorio, y en segundo, porque la presión en el interior del intercambiador puede llegar a ser excesiva (fugas).
- Al igual que con los caudales de agua, tampoco se debe trabajar con caudales de biogás distintos a los calculados para el modelo. Ni menores porque se obtendremos una temperatura menor del agua, ni mayores, porque si el quemador no está adaptado, pueden producirse más gases tóxicos o inquemados de los deseados al producirse una reacción incompleta.
- Debe protegerse en la medida de lo posible el calentador de la lluvia, ya que, a pesar de que no debería influir sobre su funcionamiento, a la larga puede producir óxidos y desperfectos indeseables.
- Es recomendable llevar a cabo ocasionalmente las tareas de mantenimiento que se describen a continuación.

Se trata de tareas de mantenimiento sencillas para evitar tener que realizar sustituciones de elementos prematuramente.

- Limpieza adecuada del serpentín externamente eliminando el óxido y el hollín depositado.
- Al calentar agua en el interior del serpentín es fácil que se produzcan deposiciones de cal en las paredes internas disminuyendo la efectividad del intercambiador. Por otro lado, hay

que tener en cuenta que los depósitos de agua estancada a una temperatura de entre 20 y 40°C son ideales para la formación de bacterias como la *legionella*, que es potencialmente peligrosa y se contagia al aspirar los vapores y micropartículas del agua caliente. Limpiar con producto adecuado.

- Revisión de las uniones de agua y gas, sustitución de la cinta de teflón y búsqueda de fugas en las tuberías.
- Limpieza del quemador y sobre todo del agujero del inyector, ya que dado su pequeño diámetro es fácil que se obstruya parcialmente.
- Recalibración de la masa del reservorio para obtener el caudal deseado.



## 7. Conclusiones

---

A la finalización del trabajo se hace imprescindible establecer los límites a los que está sujeto, el alcance del modelo y la exactitud con que a través de los problemas planteados se puede predecir el comportamiento en la realidad. Así mismo, se pretende recoger las posibles ideas de mejora que me han ido surgiendo en su realización y el que, a mi criterio, podría ser el paso siguiente a este estudio y que complementa los puntos aquí detallados. Por último se describen las impresiones y sensaciones que me ha producido el llevar a cabo este PFC y la satisfacción que suscita el finalizarlo.



## 7.1. Limitaciones del trabajo

Este trabajo pretende dar las ideas básicas para construir un calentador como el que se ha propuesto, pero también aportar y recopilar la información necesaria para analizar técnicamente su comportamiento y modificar los resultados en caso necesario.

Los modelos propuestos dan una idea general de cómo van a comportarse en la realidad los elementos del calentador siempre que se mantenga una misma geometría y se trabaje dentro de unos límites establecidos: A través de las pruebas experimentales se han comprobado ciertos parámetros para casos particulares y el ajuste del modelo a la realidad en esos casos es preciso, sin embargo, a medida que se alejan de ellos, el comportamiento real puede ser diferente al previsto por los programas, a pesar de que su cálculo se ha realizado en base a conocimientos teóricos. Los parámetros más importantes se resumen a continuación así como los límites que se considera que los modelos responderán correctamente.

- Caudal de biogás. En la práctica se ha trabajado con caudales de entre 0,00010 y 0,00030 m<sup>3</sup>/s, y se considera que los caudales de biogás admisibles para la introducción en el programa ser como mucho hasta 0,00045 m<sup>3</sup>/s. Estos caudales de biogás son más que suficientes para la finalidad con la que se ha diseñado el calentador.
- Caudal de agua. Experimentalmente se trabajó con caudales de agua en el serpentín de 1 a 2,5 L/min. y el modelo de intercambiador se ajusta perfectamente a los resultados en este rango, así que se considerará como límites de trabajo para el caudal de agua de 1 y 3 L/min.
- Composición del biogás. La composición del biogás en los experimentos realizados era de un 55% de metano. A mayor cantidad de metano, mayor poder calorífico, por lo cual la temperatura de los GPC ajustada en el modelo podría variar si el contenido en CH<sub>4</sub> es mucho mayor o mucho menor. Por ello se considerará factible el modelo para composiciones de biogás similares a las de las pruebas (50-60% de metano)
- Temperatura externa. A pesar de que teóricamente estos calentadores no se ven muy influidos por la temperatura externa al calentador, y por ello no se han tenido en cuenta en la modelización puede que los resultados reales se vean ligeramente influidos si la temperatura externa se aleja de aquella a la que se realizaron las pruebas (20-25°C). Si los resultados variasen mucho se haría necesario corregir el modelo para tener en cuenta estos efectos.
- Geometría del quemador. El quemador utilizado en las pruebas respondió correctamente para los caudales de biogás utilizados, sin embargo, se proponen diferentes dimensiones para el caso de trabajar con caudales mayores aunque no existe justificación experimental, sólo teórica. Por ello, no se asegura que para medidas diferentes de quemador (tubo de mezcla, lumbreras o cabezal), los resultados vayan a ser igual de satisfactorios.
- Geometría del intercambiador. El intercambiador comprobado estaba conformado únicamente por un bobinado, por lo que no está constatado experimentalmente que los resultados que nos da el modelo para un mayor número de bobinas, o dimensiones del tubo, vaya corresponderse exactamente con la realidad. Sin embargo, se ha hecho especial hincapié en la teoría aplicada en este sentido al modelo, para que los resultados obtenidos sean lo más fiable posibles.

Por ello se es consciente de que el programa diseñado, a pesar de arrojar luz sobre los posibles resultados para un calentador con biogás de bajo costo, no está completamente acabado, y se requiere un mayor número de comprobaciones y por métodos más exactos, ya que dadas las condiciones rudimentarias en las que se llevaron a cabo las pruebas no se pueden esperar grandes precisiones. Y de esta forma aportar resultados más fiables sobre todo en aquellas situaciones en las que no se dispone en la actualidad de resultados experimentales.

## 7.2. Posibles mejoras y camino a seguir

Este trabajo se constituye, en mi opinión, no como un estudio definitivo, sino como punto de partida para el diseño de calentadores de biogás. En la búsqueda de bibliografía previa a comenzar a diseñar el calentador me fue realmente complicado encontrar información acerca de calentadores de agua de bajo costo, no ya de biogás, sino de cualquier tipo. Por ello, en este estudio se pretende recopilar la información necesaria para su comprensión general, y se propone una idea de calentador, con materiales simples y asequibles. Lo cual no quiere decir, ni que sea la mejor idea, ni que, ni mucho menos el estudio finalice aquí. Como se ha comentado, aún en este tipo de calentador quedan puntos abiertos, por lo que el trabajo está completamente abierto a nuevas experiencias y posibles mejoras.

- En base a la figura 6.7, se ve que existe un hueco delimitado por las barras guía por las que no circula el intercambiador. Este hueco representa un camino alternativo para los GPC del quemador, que pueden salir del calentador sin transferir su calor al agua. Una posible mejora sería evitar que los GPC ascendieran por este espacio, cerrándolo de alguna manera con algún material que soportase bien las altas temperaturas (arcilla, cemento, arena, o lámina metálica) de forma que la totalidad de los gases atravesaran el intercambiador mejorando la eficiencia.
- El cálculo del intercambiador se realiza para una distancia determinada al cabezal del quemador (10 cm) que se supuso desde un inicio como medida de seguridad para evitar el contacto del serpentín con los GPC excesivamente calientes, sin embargo se desconoce la mejora de rendimiento que provocaría situar el intercambiador más cerca del cabezal. Aunque como se ha comentado esto podría comprometer la integridad del intercambiador.
- Para ganar superficie del intercambiador expuesta a los gases de combustión, y con ello aumentar la transferencia de calor por radiación, se propone, manteniendo siempre una distancia prudencial con la llama, que en ningún caso debe tocar el serpentín, alargar los bobinados más externos hasta por debajo del cabezal del quemador. Esto provocará un aumento de la transferencia de calor, sin comprometer la seguridad del serpentín ya que los GPC muy calientes no atravesarán esta zona del intercambiador. Es decir consiste en crear una superficie exclusivamente radiante en el intercambiador como se hace en los hornos industriales.
- Con el mismo fin de mejorar la transferencia de calor por radiación, sería efectivo cubrir las superficies internas de la carcasa del calentador con algún material de alta reflectividad, como podría ser el papel de aluminio. Esto provocaría que toda la radiación emitida por los GPC calientes acabara en el serpentín en vez de transferirse a la carcasa en forma de pérdidas.
- En los casos en los que la temperatura de salida del calentador fuera inferior a la deseada, sería útil aumentar la temperatura de entrada al intercambiador unos grados. Esto podría hacerse utilizando un intercambiador solar previo a la entrada al calentador con un acumulador, de forma que el calentador de biogás tomase el agua de un reservorio con la temperatura mayor. Aunque obviamente, esto supondría un gasto mayor.
- También sería práctico la colocación del calentador de gas en el interior de una vivienda y diseñar la evacuación de humos para calentar la estancia, haciendo que circule alrededor de la habitación y luego sacándolos al exterior por medio de tuberías. De esta forma se aprovecharía el calor residual de los GPC al salir del calentador (a unos 40°C), y mejorando así la eficiencia en la quema del combustible. Además también las pérdidas a través de la carcasa irían a parar al interior de la vivienda.

Como se ha comentado, este trabajo se establece como punto de partida a partir del cual se puede diseñar calentadores de biogás para las comunidades rurales de Bolivia. No obstante, no se garantiza en muchos casos el comportamiento del calentador si las condiciones difieren mucho de las experimentadas en este trabajo. Por ello sería interesante seguir haciendo comprobaciones variando diferentes variables y aplicando los resultados para que el modelo sea lo más práctico posible.

Una vez se disponga del modelo fiable, podrían diseñarse los calentadores para cada caso particular, para cada comunidad. El calentador ha sido diseñado para tener un comportamiento simple, de forma que su comprensión a nivel práctico no suponga un obstáculo en su utilización, modificación



o mantenimiento. Por ello, en base a este diseño, podrían introducirse estos calentadores en aquellas áreas rurales donde lo requiriesen, teniendo en cuenta que apenas se requiere mano de obra cualificada para su construcción y que el precio final rondaría los 30-40\$.

### 7.3. Conclusiones personales

---

A la finalización del trabajo se consideran que los resultados obtenidos son satisfactorios. Se ha conseguido modelizar un calentador de agua, sin rebasar los límites técnicos y económicos establecidos, atendiendo a los criterios de simplicidad y reducida necesidad de mano de obra cualificada desde los que se partía.

Así mismo se considera que el trabajo supone una fuente de información realmente útil para aquel que desee, tanto construir un calentador de agua como el aquí propuesto, introducir nuevas mejoras, o tener un punto de partida para establecer un nuevo diseño con la misma finalidad.

A pesar de que, personalmente, me quedo con las ganas de completar los modelos con una mayor cantidad de pruebas experimentales con diferentes variables y en distintos escenarios debido a que desde el lugar en el que finalizo el trabajo, no dispongo de medios materiales para hacerlo, creo que en el estudio se aporta la información necesaria para que otro continúe el trabajo desde el punto en el que yo lo dejo.



## ANEXOS

---

ANEXO A: Correspondiente al punto 2. Mapas político, geográfico y energético de Bolivia.

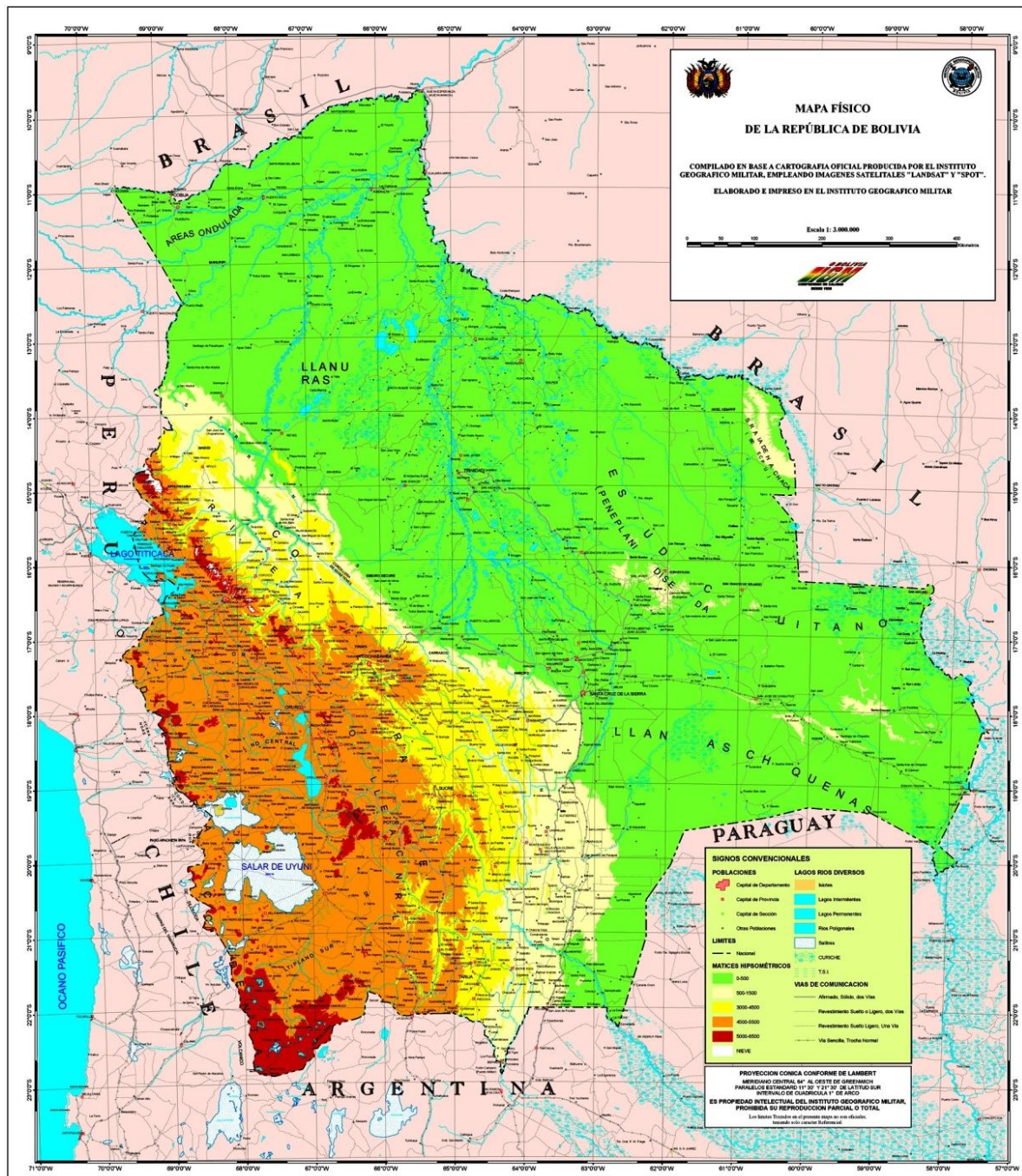
ANEXO B: Correspondiente a los capítulos 3 y 4. Propiedades de los fluidos, Teorema de Bernoulli y efecto Venturi, Ecuaciones del inyector, intercambiadores de calor, combustión y propiedades de la llama y transmisión de calor.

ANEXO C: Correspondiente al punto 5. Resultados de las pruebas y planos.

ANEXO D: Líneas de programación en MATLAB de los modelos diseñados para el calentador y el intercambiador

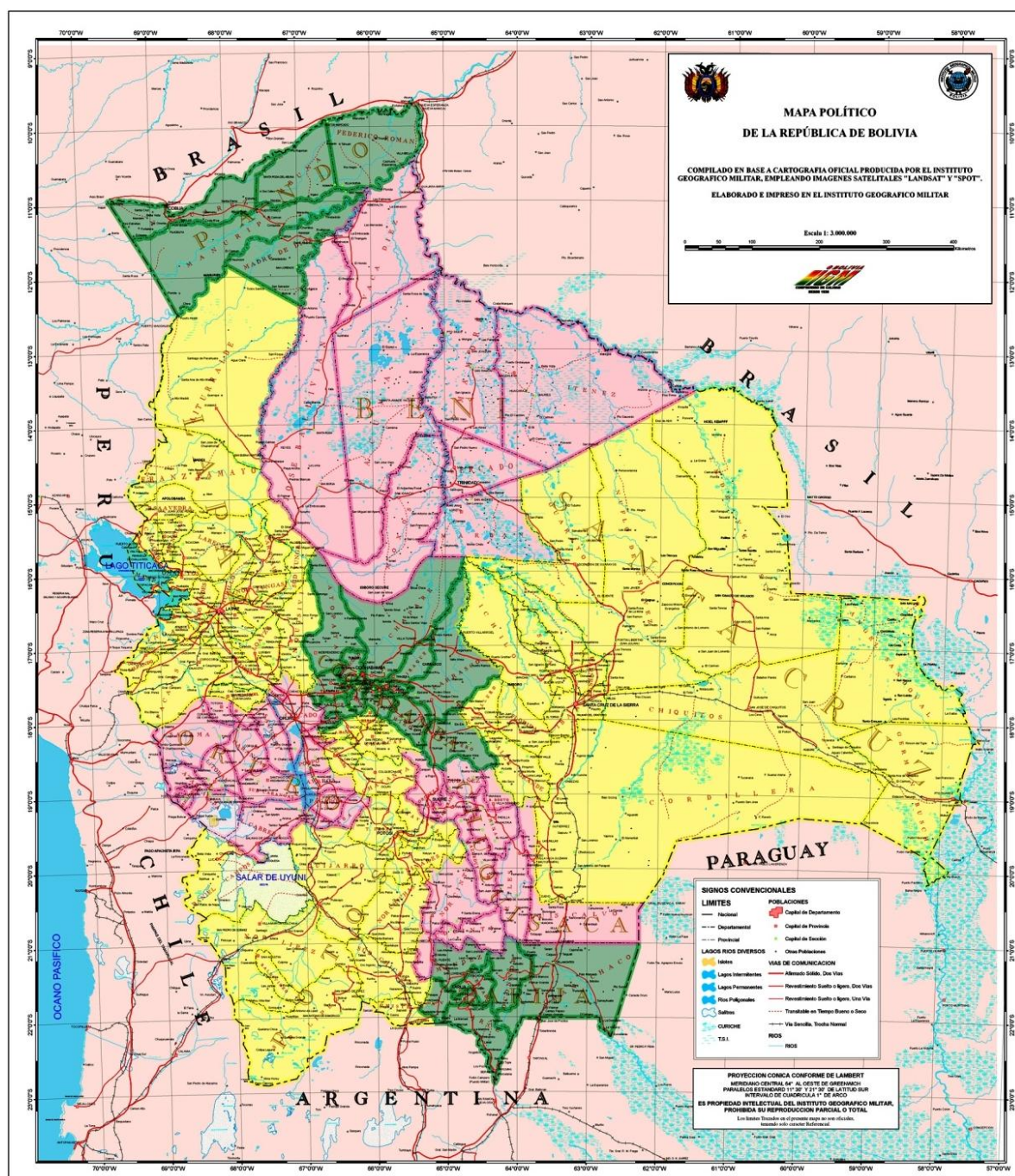


A.1. Mapa físico de Bolivia. Fuente: Instituto Geográfico Militar (Bolivia)

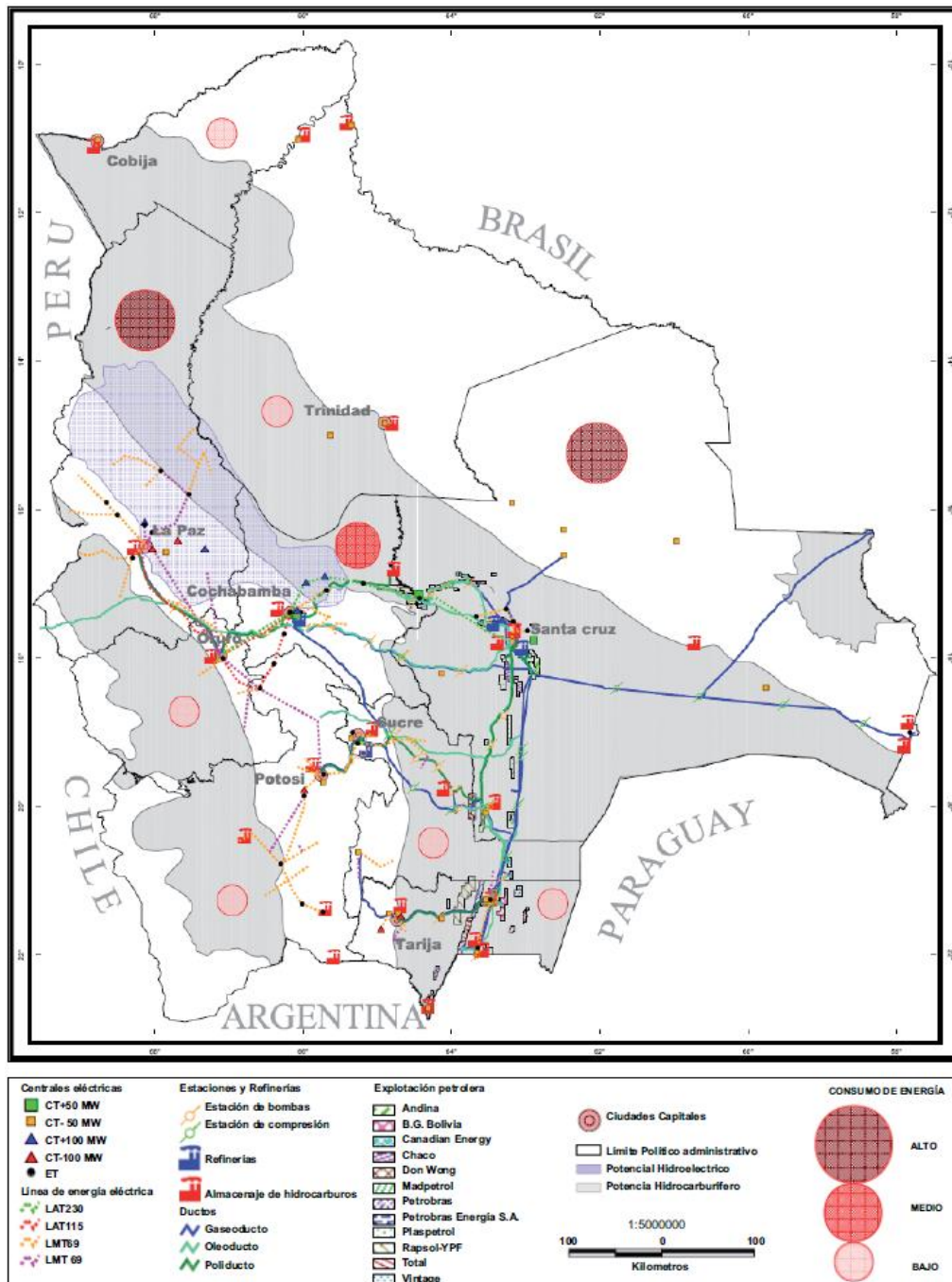




A.2. Mapa político de Bolivia. Fuente: Instituto Geográfico Militar (Bolivia)

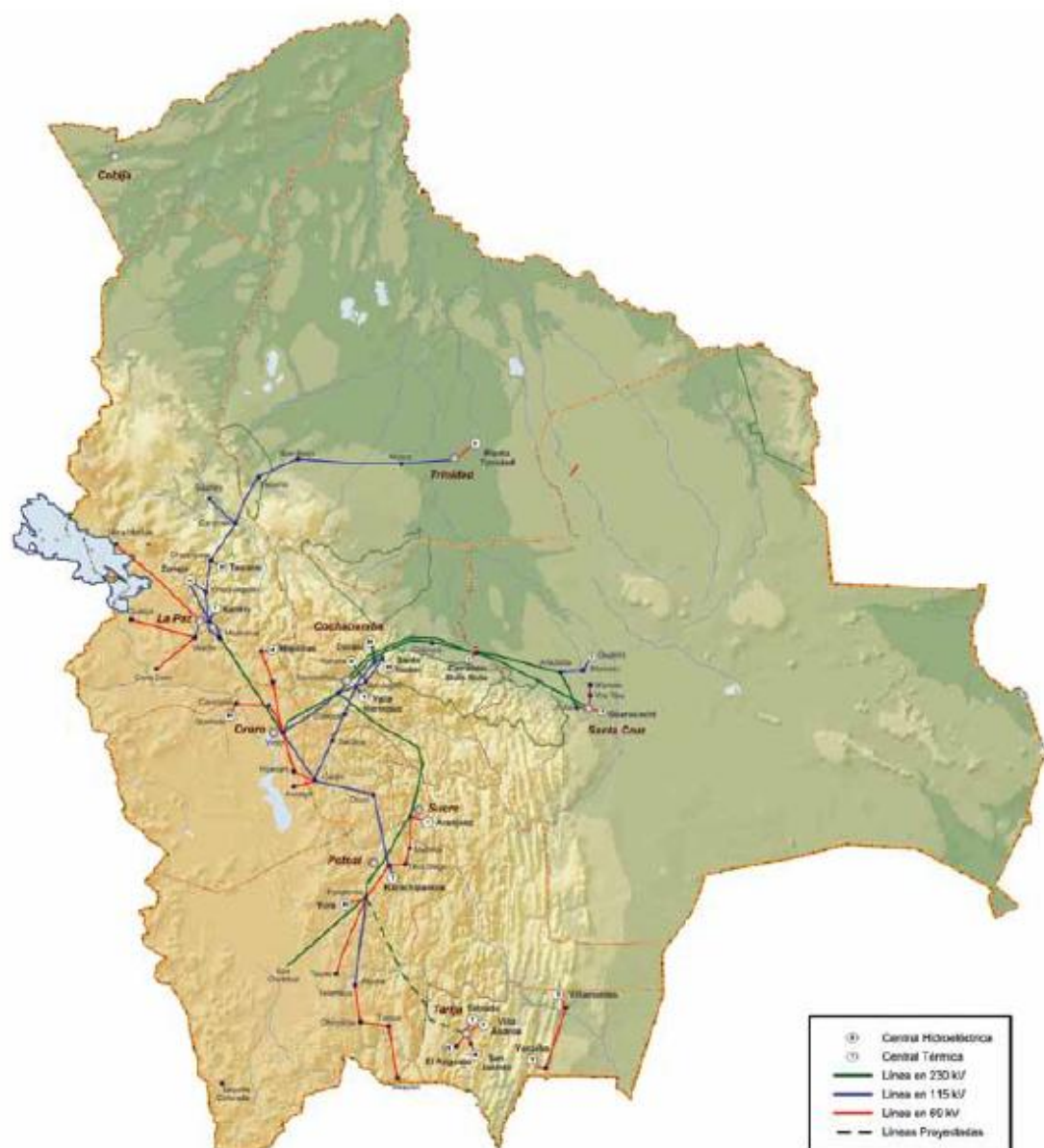


A.3. Mapa energético de Bolivia. Fuente: Balance Energético Nacional 2000-2009



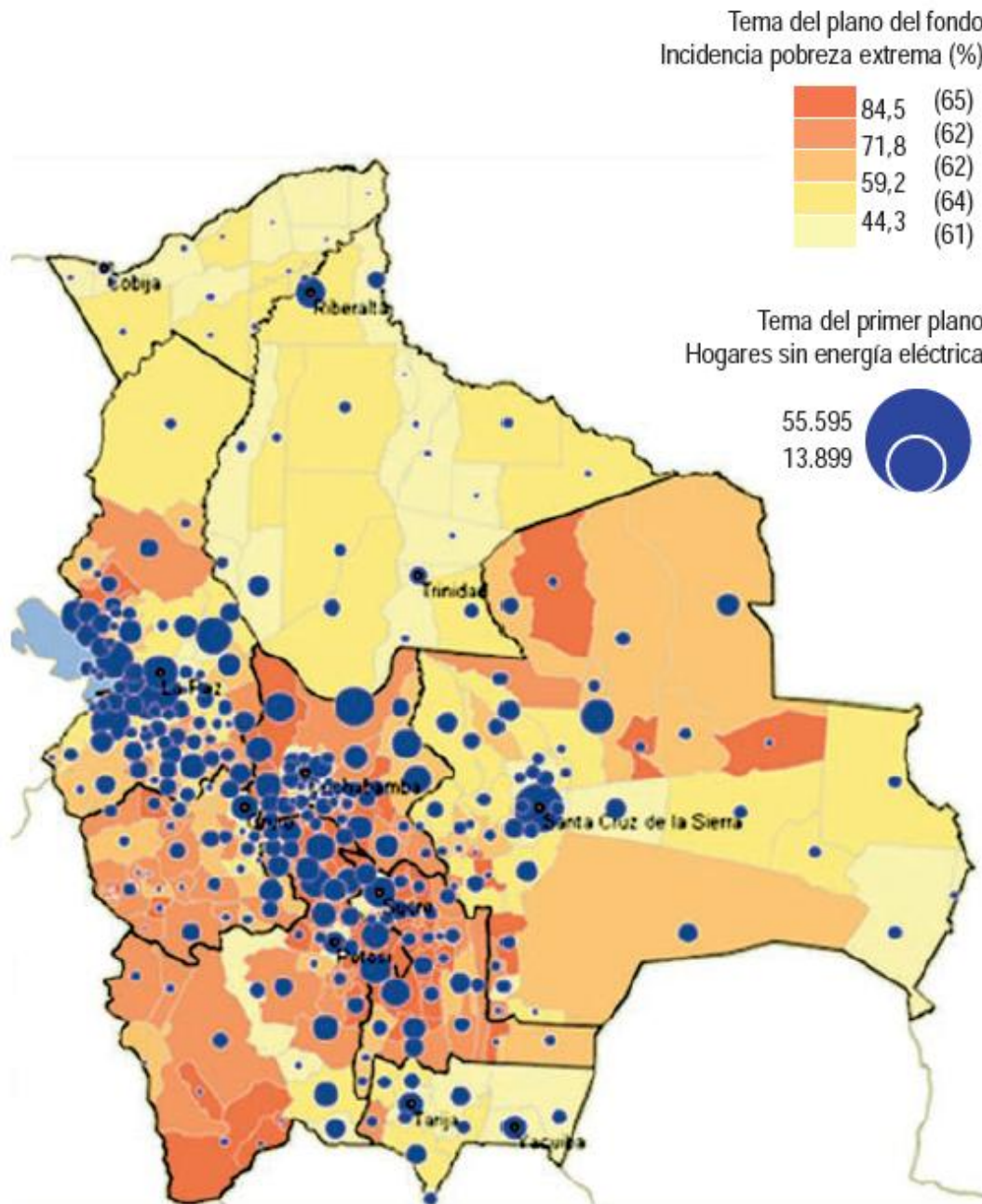


A.4. Mapa del sistema interconectado de Bolivia a 2010. Fuente: BEN 2000-2009





A.5. Mapa de poblaciones sin electricidad en Bolivia. Fuente: INE 2004 Bolivia





### B.1. Propiedades de los fluidos. Variación con la temperatura y la presión.

Para la resolución de los problemas del quemador e intercambiador se hace necesaria la caracterización de los fluidos involucrados y la determinación de sus propiedades en función de su temperatura y presión.

Para considerar la variación de las propiedades físicas de las distintas sustancias, se aproximaron los valores tabulados de cada una para una presión estándar de 1 atm y diferentes temperaturas mediante una regresión implementada en MATLAB. De esta forma obtenemos fórmulas del siguiente tipo:

$$\theta(T) = a_4 T^4 + a_3 T^3 + a_2 T^2 + a_1 T + a_0 \quad (B.1)$$

Donde  $\theta$  es una propiedad arbitraria de la sustancia, a saber: densidad,  $\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ , calor específico  $C_p \left[ \frac{J}{kg^\circ C} \right]$ , conductividad térmica  $k \left[ \frac{W}{m^\circ C} \right]$ , viscosidad cinemática  $\nu \left[ \frac{m^2}{s} \right]$ , y número de Prandtl  $Pr$ . Los valores de las constantes  $a_i$ , difieren para cada propiedad, así como para cada sustancia y aparecen en las tablas B1-B7.

La densidad de los gases se ve afectada también por la presión, por ello, y dadas las condiciones de altitud sobre el nivel del mar a las que estará destinado el calentador y que la presión varía fuertemente con la altura, se hace necesario introducir el parámetro de la altura a la hora de calcular esta propiedad. Si consideramos que los gases involucrados se comportan como un gas ideal, se comprueba que las densidades y presiones para dos estados de equilibrio se relacionan de la siguiente forma:

$$\rho_z = \rho_0 \frac{P_z}{P_0} \quad (B.2)$$

Donde  $\rho_0$  y  $P_0$  son la densidad y presión para un punto de referencia. La presión atmosférica varía con la altitud  $z_{snm}$ , de la siguiente forma:

$$P_z = P_0 \left( \frac{T_0 + \beta z_{snm}}{T_0} \right)^{-g/R\beta} \quad (B.3)$$

siendo  $P_0$  y  $T_0$  la presión y temperatura a 0 msnm, e igual a (101325Pa) y 288,15 K respectivamente.  $g$  es la aceleración de la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>),  $R \left[ \frac{m^2}{Ks^2} \right] = 287$ , la constante de los gases para el aire y  $\beta \left[ \frac{K}{m} \right]$  el gradiente térmico de la troposfera (-0,0065). Así, la densidad de un gas perfecto a una altitud  $z$  será:

$$\rho_z = \rho_0 \left( \frac{T_0 + \beta z_{snm}}{T_0} \right)^{-g/R\beta} \quad (B.4)$$

Gracias a esta forma se consigue corregir la densidad calculada para el estado de referencia.

Por otro lado, en el caso de tener fluidos formados homogéneamente por diferentes sustancias, cada propiedad de la mezcla  $\theta_{mezcla}$  vendrá dada por la suma de la misma propiedad para cada una de las sustancias que la forman  $\theta_{sustancia\ i}$  ponderada con la fracción volumétrica de la sustancia en la mezcla  $P_{sustancia\ i}$ :

$$\theta_{mezcla} = P_{sustancia\ 1} \theta_{sustancia\ 1} + \dots + P_{sustancia\ n} \theta_{sustancia\ n} \quad (B.5)$$

Dióxido de Carbono, CO <sub>2</sub>					
Fuente	Heat Transfer-J.P. Holman				
Rango	1 atm, 250 a 600K				
	$\rho$	$C_p$	$k$	$\nu$	$Pr$
$a_4$	-	-	-	-	-
$a_3$	-2,20909E-08	2,40404E-06	-2,09697E-11	1,26263E-14	-5,65657E-10
$a_2$	3,69481E-05	-3,71039E-03	6,69030E-08	-3,68532E-11	7,59307E-07
$a_1$	-2,23911E-02	2,54817E+00	4,14760E-05	6,47807E-08	-6,77244E-04
$a_0$	5,79483E+00	3,65264E+02	-1,33585E-03	-1,49916E-06	9,22602E-01
Nitrógeno, N <sub>2</sub>					
Fuente	Heat Transfer-J.P. Holman				
Rango	1 atm, 200 a 1200K				
	$\rho$	$C_p$	$k$	$\nu$	$Pr$
$a_4$	5,74592E-12	-	-	-	2,36014E-13
$a_3$	-1,95011E-08	-2,85995E-07	7,68454E-12	1,01243E-14	-9,81546E-10
$a_2$	2,46260E-05	7,03281E-04	-4,07587E-08	-3,47279E-11	1,53564E-06
$a_1$	-1,42438E-02	-3,33483E-01	9,74354E-05	6,27428E-08	-9,49742E-04

$a_0$	3,70838E+00	1,08426E+03	3,69697E-04	1,77230E-06	8,83242E-01
Oxígeno, O <sub>2</sub>					
Fuente	Heat Transfer-J.P. Holman				
Rango	1 atm, 150 a 550K				
	$\rho$	$C_p$	$k$	$\nu$	$Pr$
$a_4$	1,37044E-10	-	-	-	1,39860E-13
$a_3$	-2,36020E-07	-1,06263E-06	1,31313E-11	5,66330E-14	-1,25304E-09
$a_2$	1,55296E-04	1,69671E-03	-4,70952E-08	-9,53997E-11	2,10672E-06
$a_1$	-4,84630E-02	-5,78434E-01	1,06320E-04	9,48998E-08	-1,17768E-03
$a_0$	7,11746E+00	9,69927E+02	-1,25634E-03	-7,81032E-07	9,06328E-01
Agua, H <sub>2</sub> O(l)					
Fuente	Transferencia de Calor y Masa-Junus A. Çengel				
Rango	1 atm, 0 a 100°C				
	$\rho$	$C_p$	$k$	$\nu$	$Pr$
$a_4$	-1,70421E-07	3,17299E-06	6,76628E-10	3,25090E-11	2,93254E-07
$a_3$	4,94893E-05	-7,78076E-04	-1,45850E-07	-9,04387E-09	-8,08170E-05
$a_2$	-8,07802E-03	7,57766E-02	6,63894E-07	9,81931E-07	8,60220E-03
$a_1$	6,46062E-02	-2,96035E+00	1,89402E-03	-5,51685E-05	-4,60936E-01
$a_0$	9,99782E+02	4,21707E+03	5,61145E-01	1,77979E-03	1,33822E+01
Vapor de agua, H <sub>2</sub> O(g)					
Fuente	Heat Transfer-J.P. Holman				
Rango	1 atm. 400 a 850K				
	$\rho$	$C_p$	$k$	$\nu$	$Pr$
$a_4$	-	-	-	-	-
$a_3$	-1,94172E-09	-4,60295E-06	-	-	-2,46154E-09
$a_2$	4,71786E-06	9,82145E-03	1,30303E-08	9,09091E-14	5,36690E-06
$a_1$	-4,18159E-03	-6,26371E+00	6,74091E-05	3,59567E-08	-3,74695E-03
$a_0$	1,59517E+00	3,23752E+03	-3,01939E-03	-9,54303E-07	1,83606E+00
Aire					
Fuente	Transferencia de Calor y Masa-Junus A. Çengel				
Rango	1 atm, -50 a 200°C				
	$\rho$	$C_p$	$k$	$\nu$	$Pr$
$a_4$	8,64343E-11	-2,81906E-08	-	-7,80485E-16	-2,65666E-11
$a_3$	-5,42624E-08	1,22977E-05	-	2,16082E-13	1,13846E-08
$a_2$	1,75341E-05	-1,14566E-03	-2,41835E-08	-4,65808E-11	-9,74741E-07
$a_1$	-4,75638E-03	4,51115E-02	7,55994E-05	4,84599E-08	-2,42804E-04
$a_0$	1,29207E+00	1,00628E+03	2,36337E-02	1,72990E-05	7,36189E-01
Metano, CH <sub>4</sub>					
Fuente	Thermophysical Properties of Fluids II.-B.A. Yongglove and J.F. Ely				
Rango	1 atm, 270 a 350K				
	$\rho$	$C_p$	$k$	$\nu$	$Pr$
$a_4$	-1,25291E-10	8,01282E-08	-1,16550E-11	2,62238E-14	-
$a_3$	1,32718E-07	-1,10899E-04	1,26004E-08	-3,37801E-11	-
$a_2$	-4,41176E-05	6,51222E-02	-4,81333E-06	1,62410E-08	-
$a_1$	1,97154E-03	-1,54938E+01	8,79787E-04	-3,42237E-06	-
$a_0$	1,46331E+00	3,36825E+03	-4,24283E-02	2,75909E-04	-

**Tabla 0.1. Coeficientes de cálculo por regresión de varias propiedades para los fluidos involucrados. Fuente: Elaboración propia**

## B.2. La ecuación de Bernoulli y el efecto Venturi

La fuerza que conduce tanto el gas como el aire al quemador es la presión del gas en la tubería de alimentación, y la ecuación que relaciona la presión con el flujo del fluido es la ecuación de Bernoulli. La denominada ecuación o teorema de Bernoulli representa el principio de conservación de la energía mecánica aplicado al caso de una corriente fluida ideal. La suposición de una serie de hipótesis en el fluido simplificará el problema a la deducción de la ecuación en su forma más sencilla:

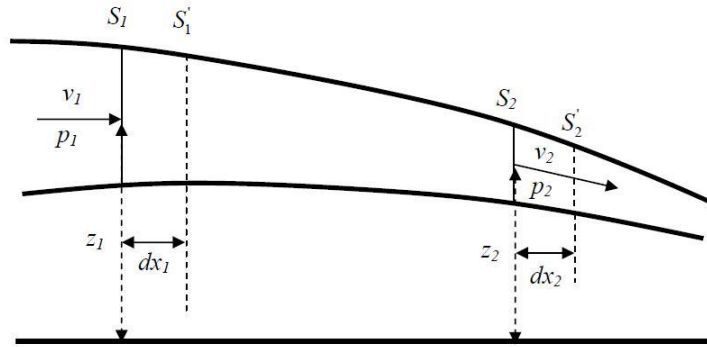


Ilustración 0.1. Línea de corriente fluida

- Flujo estacionario. Las propiedades del fluido y condiciones de contorno no variarán con el tiempo.
- Flujo incompresible. Se supondrá que la densidad  $\rho$  del fluido permanecerá constante.
- Flujo laminar. El flujo está formado por líneas de corriente y la velocidad de las partículas es tangente a éstas.
- Flujo estrecho. La presión  $p_i$  y velocidad  $v_i$  para una misma sección  $S_i$  permanecerán constantes para toda la sección.
- Fluido no viscoso. Se considerará que la viscosidad y del fluido será nula.
- No existirá intercambio de calor o trabajo con el exterior del flujo.

Considérese un tubo de corriente como el representado en la ilustración 0.1, con una porción de fluido delimitada por las secciones transversales  $S_1$  y  $S_2$  en un cierto instante y situadas a cotas  $z_1$  y  $z_2$  respecto a una referencia de altitud. Como el flujo es laminar y además la densidad es constante, el caudal para cualquier sección  $i$  del flujo

$$V'_i = v_i \cdot S_i \quad (B.6)$$

, permanecerá constante. Los valores de presión y velocidad se tomarán  $p_1, v_1$  para la sección 1 y  $p_2, v_2$  para la sección 2.

Al cabo de un pequeño intervalo de tiempo,  $dt$ , la porción de fluido se habrá desplazado ligeramente hasta quedar delimitada por las nuevas secciones transversales  $S'_1$  y  $S'_2$ . Estas nuevas secciones están separadas respectivamente de  $S_1$  y  $S_2$  por las distancias  $dx_1 = v_1 dt$  y  $dx_2 = v_2 dt$ . Este desplazamiento conlleva un cambio en la energía de la porción de fluido considerada, cambio que, según el Primer Principio de la Termodinámica, deberá ser igual al trabajo de las fuerzas actuantes sobre ese elemento, es decir, al trabajo de las fuerzas de presión y de las fuerzas gravitatorias. Para estas últimas, que están generadas por un campo conservativo (el campo gravitatorio), su trabajo se puede interpretar como una variación de energía potencial.

Así pues la variación de energía en la porción de fluido considerada, durante el tiempo  $dt$ , se puede expresar como:

$$dE = dE_C + dE_G = dW \quad (B.7)$$

Donde  $dE_C$  y  $dE_G$  son las variaciones de energía cinética y de energía potencial gravitatoria y  $dW$  es el trabajo de las fuerzas de presión actuantes sobre el elemento de fluido.

La variación de energía cinética es igual a la ganancia generada en la sección  $S_2 - S'_2$ , menos la correspondiente a la reducción en la sección  $S_1 - S'_1$ :

$$\begin{aligned} dE_C &= dE_{C,2} - dE_{C,1} = dm_2 \frac{v_2^2}{2} - dm_1 \frac{v_1^2}{2} = \rho S_2 dx_2 \frac{v_2^2}{2} - \rho S_1 dx_1 \frac{v_1^2}{2} = \rho S_2 v_2 dt \frac{v_2^2}{2} - \rho S_1 v_1 dt \frac{v_1^2}{2} \\ &= \rho V' dt \left( \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right) \quad (B.8) \end{aligned}$$

De modo análogo, la variación de energía potencial gravitatoria es:

$$dE_G = dE_{G,2} - dE_{G,1} = dm_2gz_2 - dm_1gz_1 = \rho S_2 dx_2 gz_2 - \rho S_1 dx_1 gz_1 = \rho S_2 v_2 dt gz_2 - \rho S_1 v_1 dt gz_1 = \rho V' dt (gz_2 - gz_1) \quad (B.9)$$

Por otro lado, el trabajo de las fuerzas de presión actuantes sobre el contorno se pueden determinar evaluando por separado los trabajos sobre las secciones  $S_1$  y  $S_2$ , como producto de las correspondientes fuerzas de presión por los desplazamientos ocurridos durante el intervalo de tiempo considerado:

$$\left. \begin{aligned} dW_1 &= p_1 S_1 dx_1 = p_1 S_1 v_1 dt = p_1 V' dt \\ dW_2 &= -p_2 S_2 dx_2 = -p_2 S_2 v_2 dt = -p_2 V' dt \end{aligned} \right\} \rightarrow dW = dW_1 + dW_2 = (p_1 - p_2) V' dt \quad (B.10)$$

Sustituyendo las Ec. B.10, B.9, y B.8 en B.7, y dividiendo por  $V' dt$  resulta el teorema o ecuación de Bernoulli:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 + \rho g z_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2 + \rho g z_2 \quad (B.11)$$

Que también puede expresarse como:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 = cte \quad (B.12)$$

Se denomina carga o altura de energía,  $H$ , a la suma de la altura de velocidad más la altura piezométrica, es decir, a la suma de los tres términos de cada miembro en la ecuación de Bernoulli:

$$H = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \quad (B.13)$$

La carga representa la energía mecánica del fluido que fluye en la sección por unidad de peso del mismo. Así pues el teorema de Bernoulli establece que la carga es constante a lo largo de una línea de corriente bajo las hipótesis iniciales consideradas.

En la práctica todos los fluidos reales son viscosos, y la aplicación de la ecuación de Bernoulli podrá perder validez en función de la importancia relativa de las fuerzas viscosas en cada caso. En efecto, la presencia de los esfuerzos viscosos en el seno del fluido y, en particular, en las zonas inmediatamente adyacentes a los contornos (zonas de capa límite), hace que el fluido deba emplear parte de su energía mecánica en compensar el trabajo de oposición de las fuerzas viscosas; éste es un trabajo no reversible, por lo que paulatinamente se produce una transformación de energía mecánica en energía interna (es decir, calor).

Desde el punto de vista de la ecuación de Bernoulli, esta transformación se contabiliza como una disminución progresiva de la altura de energía o pérdida de carga  $h_f$ . Si  $H_1$  es la carga del fluido en la sección  $S_1$  y  $H_2$  la carga del fluido en la sección  $S_2$ , se tendrá:

$$h_f = H_1 - H_2 = \left( \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left( \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 \right) \quad (B.14)$$

Estas pérdidas de carga son la suma de las producidas por la fricción del fluido con las paredes del tubo, así como las generadas al atravesar determinados puntos singulares. Existen multitud de ecuaciones empíricas para el cálculo de estas pérdidas por fricción y todas ellas son proporcionales a la longitud de su recorrido, por ello, dado que el propósito de este apartado teórico es el de dar las nociones necesarias para el diseño del quemador, cuyos recorridos son muy limitados, no se hace necesaria su explicación.

Tipo de singularidad	$K_v$
Válvula de compuerta totalmente abierta	0,2
Válvula de compuerta abierta a la mitad	5,6
Válvula de pie	1,0
Curva de 90°	0,4
Curva de 45°	0,5
Emboque	0,5
Salida a un depósito	1,0

**Tabla 0.2. Coeficientes para pérdidas localizadas**

Las pérdidas de carga que se producen en puntos determinados del circuito se conocen como pérdidas localizadas  $h_v$  y se expresan como un múltiplo de la altura de velocidad:

$$h_v = K_v \frac{v^2}{2g} \quad (B.15)$$

Donde  $K_v$  es un coeficiente determinado empíricamente para cada tipo de punto singular. Los valores aproximados aparecen en la tabla 0.2.

La densidad de los gases y de los vapores varía considerablemente con la presión. Por tanto, la disminución de presión en una tubería debida a las pérdidas de carga hará que la densidad y, por conservación de la masa, la velocidad del gas, cambien de manera significativa. Esto hace que, aparentemente, no se puedan utilizar las fórmulas convencionales que se han deducido en este apartado ya que se incumple la hipótesis de flujo incompresible propuesta inicialmente. Afortunadamente, la experiencia ha demostrado que estas relaciones son igualmente válidas para gases siempre y cuando la diferencia de presiones en el tramo calculado sea un 40% menor a la presión inicial.

La ecuación de Bernoulli, da así mismo una explicación razonable para el conocido como efecto Venturi. Este aparece cuando en una línea de corriente, se produce una estrechación, lo que provoca un aumento en la velocidad del fluido. Es decir, fijándonos en la ecuación B.6 se ve que al disminuir la sección  $S$ , deberá necesariamente aumentar la velocidad  $v$  en la misma proporción para que el caudal  $V'$  se mantenga constante. Analizando la ecuación de Bernoulli para el punto de flujo normal (1) y el estrechamiento (2), y teniendo en cuenta que toda la línea se encuentra a la misma cota:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \quad (B.16)$$

Es fácil deducir que la presión en el punto 2 disminuirá para compensar el aumento de velocidad  $v_2$ . En definitiva una disminución de la sección en una línea de corriente conduce inevitablemente a una disminución en la presión. Este fenómeno ha sido ampliamente utilizado en hidráulica y aeronáutica, y es el principio de funcionamiento en el que se basa el inyector atmosférico.

### B.3. El proceso de combustión y la llama

Cuando se produce una reacción química los enlaces de las moléculas de los reactivos se rompen y los átomos y los electrones se reorganizan para formar los productos. En las reacciones de combustión, se produce una rápida oxidación de los elementos combustibles liberando una gran cantidad de energía en forma de luz y calor. Los tres principales elementos combustibles son, el carbono, el hidrógeno y el azufre. Éste último es, por lo general, un elemento que contribuye relativamente poco en la energía liberada, pero que puede convertirse en una fuente importante de problemas debido a la corrosión y la contaminación. La combustión es completa cuando todo el carbono se quema a dióxido de carbono, todo el hidrógeno se transforma en agua, todo el azufre a dióxido de azufre y todos los elementos combustibles se oxidan totalmente. Cuando no se cumplen estas condiciones la reacción es incompleta. La reacción más general se escribe:



Al tratarse de reacciones químicas es importante tener en cuenta el principio de conservación de la masa, por lo que la masa total de cada elemento químico debe ser la misma en ambos lados de la ecuación, a pesar de que los elementos existan formando parte de diferentes compuestos químicos.

El agente oxidante, también llamado comburente, en toda reacción química es el oxígeno. Sin embargo, el oxígeno puro únicamente se utiliza en aplicaciones especiales como el corte y la soldadura de metales. En la mayor parte de los procesos, es el aire el que aporta el oxígeno necesario para la combustión. Para simplificar las reacciones de combustión se suelen tomar las siguientes simplificaciones relativas al aire:

- El aire normalmente está constituido por multitud de gases, los cuales difieren en función de diversos parámetros, sin embargo se suele considerar a efectos prácticos compuesto únicamente por un 21% de oxígeno y un 79% de nitrógeno. Con esta idealización la relación molar entre el oxígeno y el nitrógeno es  $0,79/0,21=3,76$ . Cuando el aire proporciona el oxígeno para la reacción de combustión, a cada mol de oxígeno le acompañan 3,76 moles de nitrógeno.
- También se asume que el nitrógeno presente en el aire de combustión no interviene en la reacción química. Es decir, el nitrógeno es considerado como un gas inerte. Si se alcanzan temperaturas suficientemente altas, el nitrógeno podría formar compuestos como el óxido nítrico y dióxido de nitrógeno.

Existe un parámetro utilizado comúnmente para caracterizar la relación entre la masa de aire y de combustible que interviene en la reacción. Se conoce como ratio aire-combustible, y puede escribirse tanto en forma molar (moles de aire dividido por moles de combustible, o en caso de gases ideales, volumen de aire entre volumen de combustible) o en base másica (masa de aire dividida por masa de combustible). La conversión entre estos dos valores se lleva a cabo usando los pesos moleculares del aire,  $M_{\text{aire}}$ , y el combustible,  $M_{\text{combustible}}$ .

$$AC = \frac{\text{masa de aire}}{\text{masa combustible}} = \overline{(AC)} \cdot \frac{M_{\text{aire}}}{M_{\text{combustible}}} \quad (B.17)$$



Esta relación puede darse de igual manera para flujos másicos o volumétricos:

$$AC = \frac{m'_{aire}}{m'_{combustible}} \quad \overline{AC} = \frac{n'_{aire}}{n'_{combustible}} = \frac{V'_{aire}}{V'_{combustible}} \quad (B.18)$$

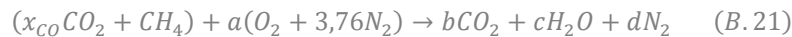
La mínima cantidad de aire que proporciona la cantidad de oxígeno suficiente para la combustión completa de todo el carbono, hidrógeno y azufre presente en el combustible es conocida como cantidad teórica de aire. Para una combustión completa con la cantidad teórica de aire, los productos de la reacción consistirán únicamente en dióxido de carbono, agua, dióxido de azufre y el nitrógeno (inerte) proveniente tanto del aire como del combustible (en el caso de que lo contuviese previamente). No aparecería oxígeno libre tras la combustión. De la misma forma se define el ratio aire-combustible teórico como:

$$AC_{teórico} = \frac{m'_{aire,teórico}}{m'_{combustible}} \quad (B.19)$$

Veamos a modo de ejemplo práctico la combustión del biogás para completar estos conceptos. Dado que la reacción se supone completa únicamente tendremos como productos de la combustión, dióxido de carbono, agua, y el nitrógeno contenido en el aire, que no reacciona. Por otro lado, el biogás se supone compuesto por una mezcla de  $CO_2$  y  $CH_4$ , cuya proporción viene dada por  $x_{CO}$  y se calcula fácilmente a partir del porcentaje volumétrico de cada uno de estos componentes:

$$x_{CO} = \frac{\% CO_2}{\% CH_4} \quad (B.20)$$

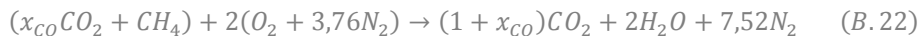
Así nos queda:



, donde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  representan los moles de oxígeno, dióxido de carbono, agua y nitrógeno respectivamente. Tal y como se ha explicado anteriormente cuando el oxígeno es aportado por el aire, a cada mol de oxígeno le acompañan 3,76 moles de nitrógeno. Aplicando el teorema de conservación de la masa a los diferentes elementos nos resulta el siguiente sistema de ecuaciones:

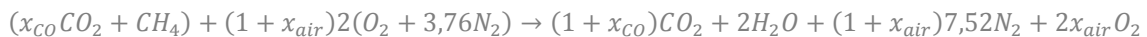
$$\begin{cases} \text{Carbono:} & b = 1 + x_{CO} \\ \text{Hidrógeno:} & 2c = 4 \\ \text{Oxígeno:} & 2b + c = 2a \\ \text{Nitrógeno:} & d = 3,76a \end{cases}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones nos queda que la ecuación de reacción ajustada es:



El coeficiente 2 que precede al término  $(O_2 + 3,76N_2)$  en la B.22 es el número de moles de oxígeno en el aire de combustión por mol de combustible (metano) y no la cantidad de moles de aire. La cantidad de moles de aire teórico es 2 moles de oxígeno, más 2 por 3,76 moles de nitrógeno, dando un total de 9,52 moles de aire por mol de combustible.

Normalmente la cantidad de aire aportada a la combustión es mayor o menor que la cantidad teórica de aire. La cantidad de aire realmente suministrada se expresa comúnmente en términos del porcentaje de aire teórico. Por ejemplo, 150% de aire teórico significa que realmente el aire suministrado es 1.5 veces la cantidad teórica de aire. La cantidad de aire suministrado puede expresarse alternatively como un exceso o una deficiencia en porcentaje de aire. Por lo tanto, 150% de aire teórico es equivalente a un exceso de aire de 50%, y 80% de aire teórico es lo mismo que una deficiencia de 20% de aire. Esto se puede expresar de forma genérica modificando la ecuación B.22 como sigue:



Donde  $x_{air}$  expresa el exceso de aire en tanto por uno. Por lo que si se le asigna el valor nulo se estará trabajando con el 100% del aire teórico, es decir con la cantidad teórica de aire.

Se tienen en total tres mezclas de gases en la reacción: por un lado el biogás, compuesto por  $CO_2$  y  $CH_4$ , y el aire, formado por  $O_2$  y  $N_2$ ; y por otro lado los GPC, formados a su vez por  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$  y  $O_2$ . Agrupando estas mezclas y reescribiendo esta reacción se tiene:



A partir de estas dos últimas ecuaciones pueden sacarse las proporciones de gases que nos interesan. En primer lugar la proporción molar, aire-combustible:

$$\overline{AC} = \frac{[9,52(1 + x_{air})]}{(1 + x_{CO})} \quad (B.24)$$



El ratio aire-combustible teórico se obtiene cuando utilizamos la cantidad teórica de aire, es decir  $x_{air} = 0$ . La proporción GPC-combustible  $x_{GPC}$ , en la reacción será:

$$x_{GPC} = \frac{(10,52 + x_{CO} + 9,52 \cdot x_{air})}{(1 + x_{CO})} \quad (B.25)$$

Así mismo, la proporción de cada gas en cada una de las mezclas de gases involucradas vendrá dada por los moles de cada gas entre la cantidad total de moles en la mezcla.

Para el biogás:

$$P_{CO,bio} = \frac{x_{CO}}{(1 + x_{CO})} \quad (B.26)$$

$$P_{CH,bio} = \frac{1}{(1 + x_{CO})} \quad (B.27)$$

Para los GPC:

$$P_{CO,GPC} = \frac{(1 + x_{CO})}{10,52 + x_{CO} + 9,52 \cdot x_{air}} \quad (B.28)$$

$$P_{HO,GPC} = \frac{2}{10,52 + x_{CO} + 9,52 \cdot x_{air}} \quad (B.29)$$

$$P_{N,GPC} = \frac{7,52(1 + x_{air})}{10,52 + x_{CO} + 9,52 \cdot x_{air}} \quad (B.30)$$

$$P_{O,GPC} = \frac{2x_{air}}{10,52 + x_{CO} + 9,52 \cdot x_{air}} \quad (B.31)$$

Para el aire:

$$P_{O,air} = \frac{2(1 + x_{air})}{9,52(1 + x_{air})} = 0,21$$

$$P_{N,air} = \frac{7,52(1 + x_{air})}{9,52(1 + x_{air})} = 0,79$$

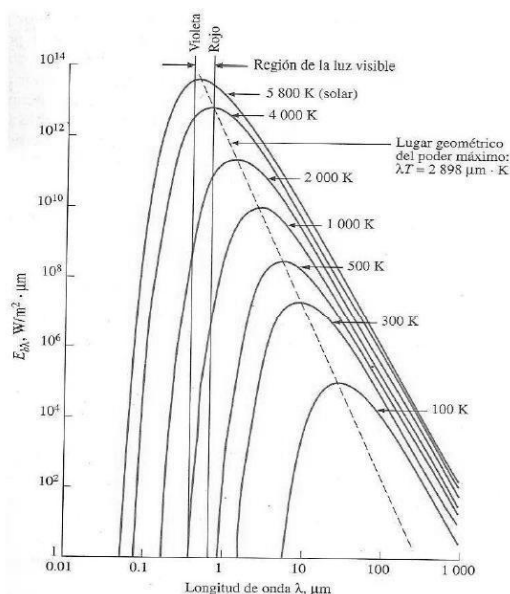
Se habla de mezcla rica cuando la cantidad de aire en la reacción es superior a la teórica. En lo explicado anteriormente se ha supuesto una reacción completa. Es decir, todos los reactivos se oxidaban completamente, y, para un hidrocarburo como combustible, los únicos productos finales podían ser el  $CO_2$ , el  $H_2O$ , el  $N_2$  y el  $O_2$  en caso de existir exceso de aire. Si la reacción es completa, cada uno de los productos puede ser calculado aplicando el principio de conservación de la masa a la reacción ajustada. Cuando la reacción es incompleta, los productos de la combustión nos son desconocidos, de forma que es mucho más complicado realizar el balance.

La combustión es el resultado de una serie de complicadas y rápidas reacciones químicas, y los productos formados dependen de muchos factores. Cuando el combustible se quema, por ejemplo, en el interior de un cilindro de un motor de combustión interna, los productos de la reacción varían con la temperatura y la presión en el cilindro. En equipos de combustión de todo tipo, el grado de mezcla del combustible y el aire es un factor de control de las reacciones una vez se inicia la combustión. Aunque la cantidad de aire suministrado en un proceso de combustión real exceda la cantidad teórica, no es raro que algo de monóxido de carbono y oxígeno sin quemar aparezcan en los productos. Esto puede ser debido a la mezcla incompleta, a la falta de tiempo para que se produzca combustión completa, y otros factores. Cuando la cantidad de aire suministrado es menor que la cantidad teórica, los productos pueden incluir tanto  $CO_2$  y  $CO$ , como trazas del combustible sin quemar. A diferencia de los casos de combustión completas considerados anteriormente, los productos de la combustión en un proceso de combustión real y sus cantidades relativas sólo pueden ser determinados por medición.

La medición de los productos de la combustión no siempre es un proceso factible, ya que se necesita instrumentación específica y unas condiciones de medición apropiadas. Por ello en muchos casos, sobretodo de forma práctica, se recurre a la observación directa del fenómeno característico de la reacción de combustión: la llama. Teniendo en cuenta ciertos conceptos se pueden sacar algunas conclusiones aproximadas del proceso. Las propiedades que hay que tener en cuenta son el color de la llama y la distancia de esta al cabezal.

Lo que se conoce comúnmente como llama, son en realidad gases, que debido al carácter exotérmico de la reacción de combustión que ocurre en su seno, se calientan y adquieren temperatura suficiente para emitir radiación en el rango visible. En un principio, todo cuerpo cuya temperatura se encuentre por encima del cero absoluto emite radiación en una franja de longitudes de onda tal y como podemos observar en la ilustración 0.2. para la radiación de un cuerpo negro (cuerpo idealizado). Observamos que la cantidad de radiación, así como la franja de longitudes de onda en las que se emite, dependen de la temperatura. Y dependiendo de la longitud de onda en que emita un

objeto en el rango visible lo veremos de un color u otro. Existe por tanto una relación entre la percepción visual del color de un objeto a alta temperatura y su temperatura.



**Ilustración 0.2.** Variación del poder de emisión de cuerpo negro con la longitud de onda para varias temperaturas. Fuente: *Transferencia de Calor y Masa-Junus A. Çengel*

En la combustión en un quemador, el color de la llama depende fundamentalmente de la cantidad de aire que se mezcla con el gas antes de la combustión. Recordemos que el aire que entra por aspiración antes de que se produzca la combustión se denomina aire primario y el que se absorbe a través de la llama se denomina aire secundario. En ausencia de aire primario, la llama es incolora o toma un color rojizo dando lugar a lo que se conoce como llama blanca. Si la aireación primaria es correcta se obtiene una llama de color azul lo que nos indica dos cosas:

- La combustión que se está llevando a cabo es casi completa, con lo que se produce una mínima cantidad de CO e inquemados.
- La temperatura de la llama es mayor. Esto se deduce de lo anteriormente explicado, a mayor temperatura, los gases emiten en longitudes de onda más cortas lo que les da una tonalidad más azulada.

Es preferible por tanto una llama de color azul a una blanca. En otras palabras, si la llama es de color azul, es un indicativo de que la combustión se está llevando a cabo correctamente produciendo una mayor energía y una menor cantidad de inquemados.

Se define en este sentido el concepto de tasa de aireación primaria,  $R_p$ , como el cociente entre el aire primario y el aire teórico de combustión:

$$R_p = \frac{m'_{\text{aire primario}}}{m'_{\text{aire teórico}}} \quad (B.32)$$

Este coeficiente suele utilizarse comparando con el valor unidad, el cual equivale al sistema en el que la totalidad del aire teórico necesario para la combustión completa entra como aire primario. Nótese que esto no significa que la combustión sea estequiométrica, ya que en todo quemador hay un aporte secundario de aire durante la combustión lo que dará lugar a una combustión con exceso de aire. Si este coeficiente toma valores superiores o iguales a la unidad, se asegura que la reacción sea completa ya que con el aporte primario de aire se asegura que haya oxígeno suficiente. Si el valor es inferior a la unidad, la combustión podrá ser completa o incompleta en función del aporte de aire secundario.

Propiedades	
$R_p < 1$	La llama tiene propiedades reductoras. Es muy posible que se produzca monóxido de carbono
$R_p = 1$	Se dice que la llama es neutra
$R_p > 1$	La llama tiene propiedades oxidantes. Es raro que se produzca monóxido de carbono.

**Tabla 0.3.** Propiedades de la llama en función de su tasa de aireación primaria. Fuente: *Biblioteca del Instalador de gas, Instalaciones y equipos. A.L. Miranda y R. Oliver*

Dependiendo del valor de  $R_p$  se tendrán unas propiedades u otras en la llama que se muestran en la tabla 0.3.

La otra propiedad a tener en cuenta en la observación de la llama es la distancia de ésta al cabezal. Esta distancia depende de un concepto conocido como velocidad de propagación de la llama. La velocidad de propagación de la llama es la velocidad a la que se consume la mezcla aire-gas que sale del quemador y se mide en m/s. Es más fácil entender la propiedad cuando la reacción se produce en un combustible estático, ya que al ser la velocidad del combustible nula, sólo se observa la velocidad de propagación de la llama (la llama se desplaza en el espacio), mientras que cuando el combustible está en movimiento, como es el caso de un quemador interviene la velocidad de salida de la mezcla en contraposición con la de propagación, que si son similares, la llama permanecerá estática. Existen varios factores que afectan a la velocidad de propagación:

- La presencia de gases no combustibles en la mezcla aire-gas (como el nitrógeno del aire) hace disminuir la velocidad de propagación.
- Si aumenta la temperatura de la mezcla aire-gas, aumenta la velocidad de propagación.
- A medida que se aumenta la presión a la salida del quemador, la velocidad de propagación disminuye
- La tasa de aireación primaria influye también de manera notable. Cada gas tiene un máximo de velocidad de propagación para una tasa de aireación determinada. Para conseguir una velocidad máxima de propagación debe utilizarse una tasa de aireación apropiada.

Teniendo en cuenta este concepto se puede definir llama estable a aquella en la que la velocidad de propagación de la llama es igual a la velocidad de salida de la mezcla aire-gas del quemador. Por lo que tenemos que:

$$v_p = v_c \quad (B.33)$$

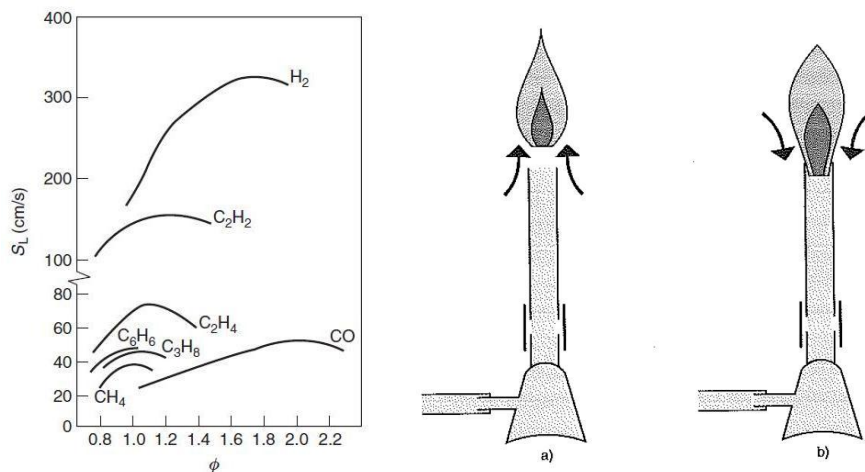
Donde  $v_p$  es la velocidad de propagación de la llama y  $v_c$  la velocidad de salida de la mezcla aire combustible del quemador en m/s. La velocidad de la mezcla aire-gas está relacionada con la sección de salida del cabezal del quemador:

$$v_c = \frac{V'_c}{S_c} \quad (B.34)$$

Donde  $V'_c$  es el caudal volumétrico de la mezcla de gases a la salida del quemador en  $m^3/s$ . Por lo que para que el cabezal de un quemador funcione correctamente deberá cumplir que:

$$S_c = \frac{V'_c}{v_p} \quad (B.34)$$

Cuando esto no ocurre, la llama es inestable y se producen los fenómenos de avance o retroceso de llama. En el primer caso, la velocidad de propagación es menor que la de salida de los gases, y la llama se separa del quemador. Es un fenómeno importante en aquellos gases combustibles en los que la velocidad de propagación es baja, como el metano, y no reviste de gravedad más que en el hecho de que la llama terminará por extinguirse. Incluso si el tamaño del cabezal del quemador está bien diseñado, variaciones en la cantidad de aire primario en la mezcla de gases pueden provocar el desprendimiento de la llama. El segundo es el caso contrario, la velocidad de propagación es mayor que la de salida de la mezcla aire-gas con lo que la llama tenderá a penetrar en el interior del quemador. Se trata de un fenómeno peligroso pues puede producir calentamientos indeseados, incendio, o explosión en el caso de que, en caso extremo, la llama alcance un depósito de gas.



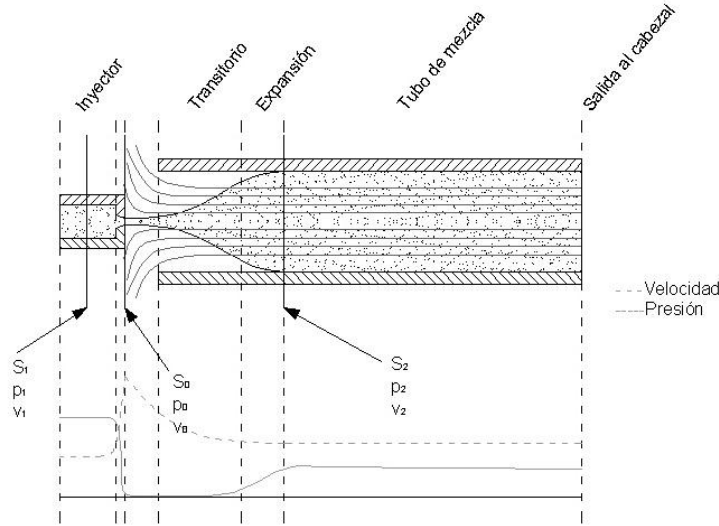
**Ilustración 0.3.** Variación de la velocidad de propagación con el ratio de aire para varios gases (izqda.) y fenómenos de avance y retroceso de llama (dcha.). Fuente: Heat Transfer-J.P. Holman

#### B.4. Ecuaciones de diseño para un quemador de gas

En lo que sigue se muestran las ecuaciones y pautas de carácter eminentemente práctico para el diseño de un quemador de gas atmosférico. El método se divide en el cálculo individual de cada uno de sus elementos: Inyector atmosférico, garganta o tubo de mezcla y cabezal.

- Inyector atmosférico

En la 0.4 se puede observar el funcionamiento general de este tipo de inyectores. Fijándonos en el gráfico de velocidades y presiones adjunto se comprueba como al hacer pasar el flujo por un orificio pequeño, se produce un aumento en la velocidad del fluido, disminuyendo, por la razón que se ha explicado previamente, la presión por debajo de la presión atmosférica. El aire que se encuentra alrededor del inyector a presión atmosférica, es aspirado por esta depresión, y posteriormente arrastrado por el flujo hacia el cabezal del quemador.



**Ilustración 0.4. Esquema de un inyector atmosférico. Fuente: Elaboración propia**

Tomando como base la ecuación de Bernoulli para los puntos previo al inyector y la garganta obtenemos:

$$\Delta p_i = p_i - p_g = \frac{\rho v_g^2}{2} - \frac{\rho v_i^2}{2} \quad (B.35)$$

Por la ecuación B.6 esta ecuación puede reescribirse:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho V_i'^2 \frac{1}{S_g^2} \left[ 1 - \left( \frac{S_g}{S_i} \right)^2 \right] \quad (B.36)$$

Que despejando el caudal da:

$$V_i' = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \frac{S_g}{\sqrt{1 - \left( \frac{S_g}{S_i} \right)^2}} \quad (B.37)$$

Esta ecuación solamente se utiliza para fluidos ideales, laminares y sin viscosidad. Para flujos reales como el caso del agua o el aire, en los que existe viscosidad y se producen ciertas turbulencias, transformando parte de la energía en rozamiento como se ha comentado previamente, se introduce el llamado coeficiente de descarga  $C_d$ :

$$V_i' = C_d \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \frac{S_g}{\sqrt{1 - \left( \frac{S_g}{S_i} \right)^2}} \quad (B.38)$$

Dado que la determinación del flujo en la ubicación 2 es bastante compleja, ya que la determinación de  $S_2$  es incierta se sustituye el coeficiente de descarga por otro valor empírico denominado coeficiente de flujo  $C_f$ :

$$C_f S_0 = C_d \frac{S_g}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_g}{S_i}\right)^2}} \quad (B.39)$$

Donde  $S_0$ , es el área transversal del orificio del inyector. Así resulta la ecuación para el caudal:

$$V'_i = C_f S_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (B.40)$$

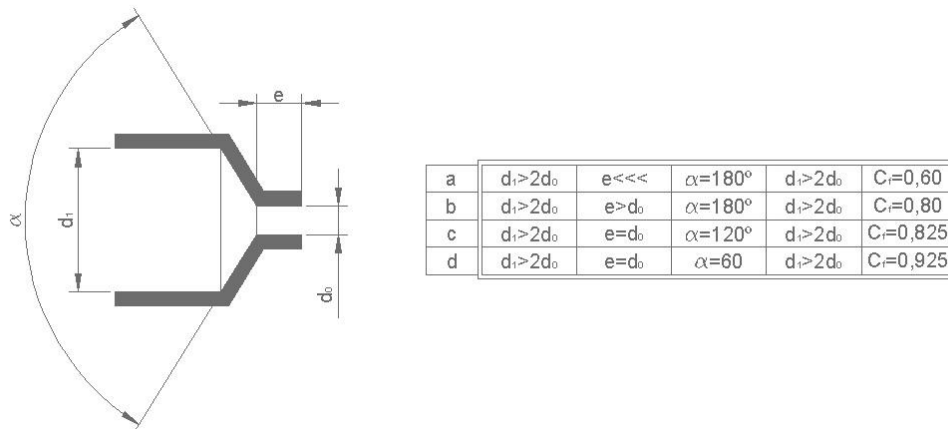
Si tomamos la presión en la garganta igual a la presión atmosférica, entonces  $\Delta p$ , será el valor de la presión manométrica en el inyector. La ecuación para el caudal a través de un inyector viene dada finalmente en m<sup>3</sup>/h por:

$$V'_i = 0,00364 C_f d_0^2 \sqrt{\frac{p_{m,i}}{\rho_r}} \quad (B.41)$$

Dónde:

- $C_f$ : Coeficiente de flujo.
- $d_0$ : Diámetro del orificio del inyector en mm.
- $p_{m,i}$ : Presión manométrica previa al paso del flujo por el inyector en Pa.
- $\rho_r$ : Densidad relativa del fluido que atraviesa el inyector.

El coeficiente de flujo está tabulado y depende en gran medida de la estructura de la forma y las dimensiones relativas del inyector. En la ilustración 0.5 aparecen algunos casos de inyectores.



**Ilustración 0.5. Coeficientes de descarga para diferentes tipos de inyector. Fuente: Elaboración propia**

La velocidad del gas a través del orificio del inyector vendrá dada como:

$$v_0 = \frac{V'}{S_0} \quad (B.42)$$

- Garganta o tubo de mezcla

El gas sale del inyector entrando en la garganta o tubo de mezcla. La garganta tiene un diámetro mucho mayor que el orificio de salida del inyector, por lo que la velocidad de la corriente de gases se ve reducida:

$$v_g = v_0 \frac{S_0}{S_g} = v_0 \frac{d_0^2}{d_g^2} \quad (B.43)$$

Ignorando la estricción de la vena fluida y la fricción,

La presión justo después del orificio de salida vendrá dada por:

$$p_o = p_t - \rho \frac{v_0^2}{2g} \left[ 1 - \left( \frac{d_0}{d_g} \right)^2 \right] \quad (B.44)$$

La presión en la garganta  $p_t$  es aproximadamente la presión atmosférica, ya que se encuentra abierta al aire, por lo que esta depresión (segundo término), conocida como presión de conducción, es suficiente para introducir el aire primario a través de las lumbreras para mezclarse con el gas en la garganta.

La cantidad de aire primario que entra por las lumbreras (volúmenes de aire primario por volúmenes de gas inyectado) depende del conocido como ratio de entrada,  $e$ , que está determinado por la relación entre las áreas de la garganta y el orificio del inyector:

$$e = \frac{V'_{air}}{V'_i} = \sqrt{\rho_r} \left( \sqrt{\frac{S_g}{S_0}} - 1 \right) = \sqrt{\rho_r} \left( \frac{d_g}{d_0} - 1 \right) \quad (B.45)$$

Donde  $S_g$  y  $d_g$  son el área transversal y el diámetro de la garganta, y  $S_0$  y  $d_0$  las del orificio del inyector. Esta relación se conoce como fórmula de Prigg.

La relación de Prigg es válida siempre y cuando el área de salida de gas por el cabezal,  $S_c$  es entre 1,5 y 2,2 veces el área de la garganta. Este ratio es prácticamente independiente de la presión y el flujo del gas.

El caudal total de gases por la garganta será la suma del gas inyectado, más el aire introducido a través de las lumbreras:

$$V'_g = V'_i + V'_{air} = V'_i(1 + e) \quad (B.46)$$

Debe evaluarse así mismo, la caída de presión en el tubo de mezcla. Se calcula primeramente el número de Reynolds:

$$Re_g = \frac{4\rho_m V'_g}{\pi\mu_m d_g} \quad (B.47)$$

Donde  $\rho_m$  y  $\mu_m$  son la densidad y viscosidad para la mezcla de gases. La caída de presión será:

$$\Delta p_g = \frac{f}{2} \rho_m \frac{16V'^2_g}{\pi^2 d_g^5} L_g \quad (B.48)$$

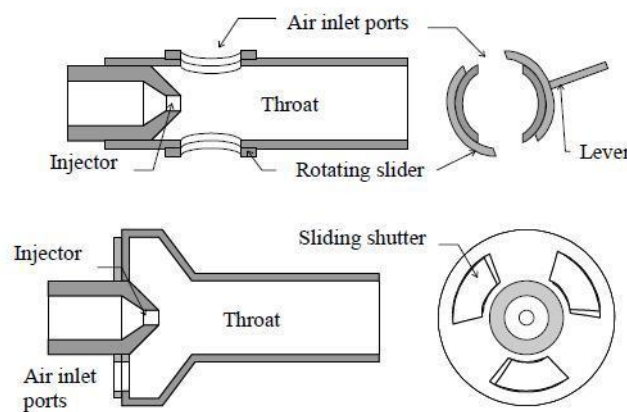
Donde

$$f = \frac{64}{Re_g} \quad \text{Si } Re_g < 2000$$

$$f = \frac{0,316}{Re_g^{1/4}} \quad \text{Si } Re_g > 2000 \quad (B.49)$$

Se recomienda que la longitud del tubo de mezcla  $L_g$ , sea alrededor de 10 veces su diámetro para conseguir una mezcla homogénea de los gases. La caída de presión en la garganta  $\Delta p_g$ , debería ser mucho menor a la presión de conducción.

Para la mayor parte de los quemadores se diseñan gargantas que aportan más aire primario del requerido, y se les implementa un sistema de control del área de las lumbreras para dosificarlo en cada situación. Existen diversos métodos tal y como se muestra en la ilustración 0.6



**Ilustración 0.6. Sistemas de control de apertura de las lumbreras. Fuente: Biogas Stove Design, David Fulford**

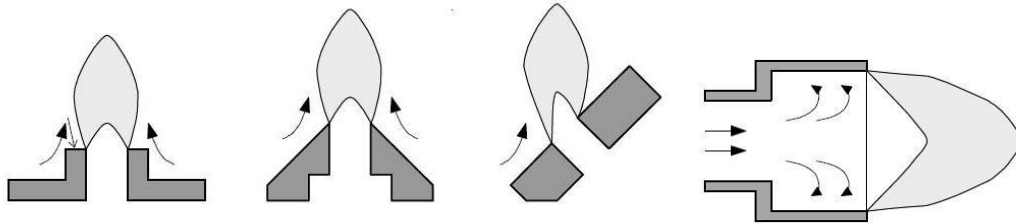
- Cabezal

La gran ventaja de un quemador de gas es que el calor puede dirigirse únicamente hacia los puntos en los que se necesita, diseñando el cabezal adecuadamente. Sin embargo se deben tener en cuenta varios fenómenos que ocurren en la combustión del gas.

En primer lugar, el área de salida total de gases debe ser el adecuado para evitar los fenómenos de avance o retroceso de llama explicados en el apartado B.3. Como se comenta, esta área de referencia  $S_c$ , está relacionada con la velocidad de propagación de la llama  $v_p$ . Esta velocidad depende de cada gas y de la proporción de aire primario introducido en la mezcla.

$$S_c = \frac{V'_c}{v_p}$$

Existen diferentes métodos para favorecer la estabilidad de la llama aún cuando el área de salida sea diferente al establecido, evitando así el desprendimiento de la llama. Esto se hace favoreciendo la entrada de aire secundario a cada agujero, bien sobre elevándolo ligeramente o poniéndolo en ángulo con la horizontal.



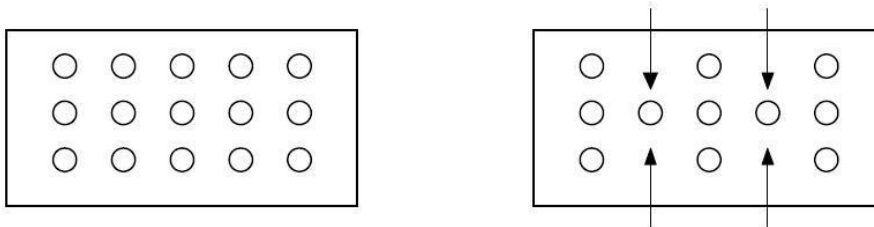
**Ilustración 0.7. Sistemas de estabilización de la llama. Fuente: Biogas Stove Design, David Fulford**

Otra solución más efectiva, aunque más costosa es provocar un ensanchamiento brusco en la salida de los gases, lo que provoca unas turbulencias que estabilizan la llama. Así podríamos reescribir la ecuación:

$$S_c = k_{\text{estabilizador}} \frac{V'_c}{v_p} \quad (B.50)$$

Donde  $k_{\text{estabilizador}} \in (0,1)$  es un coeficiente que permite reducir el área de salida del cabezal, sin comprometer la estabilidad de la llama y que estará determinado por la geometría.

Por otro lado, la salida del gas del quemador, además de tener que estar dirigida hacia los puntos deseados, debe favorecerse la aireación secundaria. Esto es, todos los agujeros de salida deben disponer de una fuente de aire secundaria en su combustión.



**Ilustración 0.8. Aireación secundaria del quemador. Fuente: Biogas Stove Design, David Fulford**

En la ilustración 0.8, el primer diseño tendrá puntos de combustión pobre, ya que los agujeros centrales no tienen acceso al aire secundario. Esto provocará que las llamas externas sean más potentes que las centrales. En el segundo caso, se producirán unas llamas más homogéneas ya que todos los puntos disponen de la misma aireación.

### B.5. Relaciones gobernantes para un intercambiador de calor

Como se ha visto, la función general de un intercambiador de calor es transferir calor de un fluido a otro. En su descripción más simple, un intercambiador puede reducirse a la circulación de un fluido por el interior de un tubo, mientras un segundo fluido circula por el exterior. Existen por tanto tres intercambios de calor que necesitan ser descritos suponiendo que la dirección del calor es desde el exterior al interior:

- Transferencia de calor convectiva del fluido exterior hacia la pared externa del tubo.
- Transferencia de calor conductiva a través de la pared del tubo.
- Transferencia de calor convectiva de la pared interna del tubo al fluido que discurre por su interior

A estos mecanismos de transmisión habría que añadir el proceso de radiación, que también se ve involucrado cuando la temperatura de uno de los fluidos es alta. Todos estos mecanismos serán explicados con mayor detenimiento en los apartados siguientes.



Consideremos que existen dos flujos en un intercambiador de calor, el fluido caliente tiene una razón de capacidad calorífica definida como  $C_c = m'_c \cdot C_{p,c}$  ( $W/^\circ C$ ) donde  $m'_c$  ( $Kg/s$ ) es el flujo másico y  $C_{p,c}$  ( $J/Kg^\circ C$ ) su capacidad calorífica a presión constante. Análogamente para el fluido frío se  $C_f = m'_f \cdot C_{p,f}$  ( $W/^\circ C$ ). Entonces, con base en la Primera Ley de la Termodinámica o Conservación de la Energía, se establece que el calor transferido entre ambos flujos se puede describir por un balance de entalpía de la forma:

$$Q' = C_c \cdot (T_{1,c} - T_{2,c}) = C_f \cdot (T_{2,f} - T_{1,f}) \quad (B.51)$$

Donde los subíndices 1 y 2 se refieren a entrada o salida del intercambiador, respectivamente, y  $T_{1,c}$   $T_{2,f}$  son empleadas para indicar las temperaturas caliente y fría, respectivamente.

La ecuación B.51 es una representación ideal donde no se consideran pérdidas de calor y ésta sólo describe el calor que será transferido (la capacidad o comportamiento del intercambiador) para el caso donde se conocen los flujos másicos y las temperaturas de operación. Sin embargo, dicha ecuación no provee ninguna indicación del tamaño del intercambiador necesaria para mejorar su capacidad o eficacia. Si consideramos el tamaño del intercambiador en la ecuación B.51 podemos escribir,

$$Q' = UA\Delta T_m \quad (B.52)$$

Donde  $A$  es el área de intercambio de calor,  $U$  el coeficiente global de transferencia de calor, y  $\Delta T_m$ , la diferencia de temperaturas media de la operación. Así, el proceso de intercambio de calor completo se puede representar por:

$$Q' = UA\Delta T_m = C_c \cdot (T_{1,c} - T_{2,c}) = C_f \cdot (T_{2,f} - T_{1,f}) \quad (B.53)$$

Que es en definitiva la combinación de las ecuaciones (1) y (2).

El coeficiente global de transferencia de calor  $U$  a través de una superficie  $A$ , se explica en el apartado B.8

Se comprueba que para los dos arreglos básicos que se muestran en la ilustración 0.9, la diferencia de temperaturas media de la operación  $\Delta T_m$  es la diferencia de temperaturas media logarítmica, la cual se puede escribir como:

$$\Delta T_m = LTMD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (B.54)$$

Donde  $\Delta T_1$  y  $\Delta T_2$ , son la diferencia de temperaturas de los fluidos caliente y frío a la entrada y la salida respectivamente:

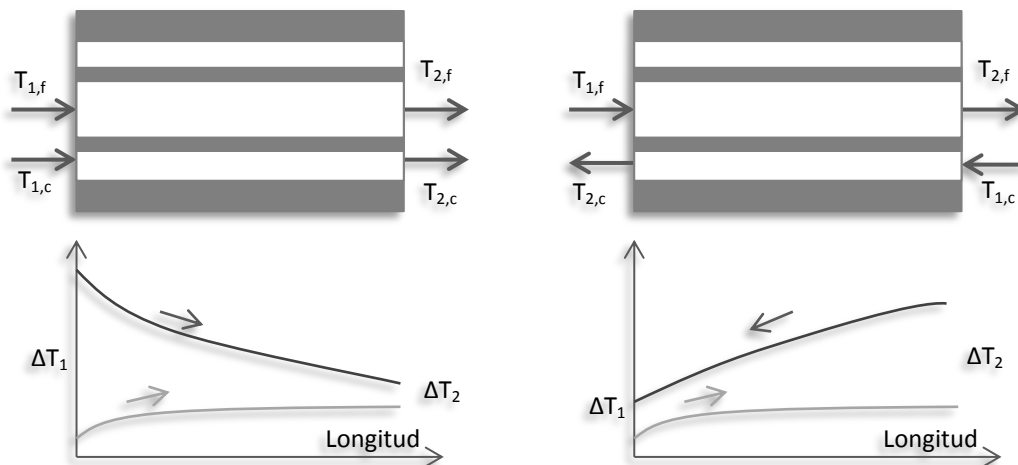
- Flujo a favor de corriente:

$$\Delta T_1 = (T_{1,c} - T_{1,f}) \quad y \quad \Delta T_2 = (T_{2,c} - T_{2,f})$$

- Flujo a contracorriente:

$$\Delta T_1 = (T_{2,c} - T_{1,f}) \quad y \quad \Delta T_2 = (T_{1,c} - T_{2,f})$$

Debe quedar claro que estas expresiones simples para la diferencia de temperatura media logarítmica sólo son válidas para aquellos casos indicados en la figura 0.9 y no pueden ser empleados para otro tipo de arreglos como el caso de flujo cruzado o intercambiadores de múltiple paso.



**Ilustración 0.9. Arreglos básicos de intercambiador, a favor de corriente (izqda.) y a contracorriente (dcha.) y perfiles de temperatura. Fuente: Elaboración propia**



La utilización de la *LTMD* está restringida a los modelos simples que se han comentado previamente. Para aplicar este método a los intercambiadores con diferentes configuraciones se aplica un factor de corrección  $F(P, R)$ .

El parámetro  $P$  en el método del factor de corrección de la diferencia de temperatura media logarítmica requiere de tres temperaturas para su cálculo. Normalmente se dispone de la temperatura de entrada tanto del flujo caliente como del flujo frío, pero cuando la de salida del lado frío no se conoce, se requiere de un método de ensayo y error para determinar  $P$ . Dicho método de ensayo y error se puede evitar en el método  $\varepsilon - NTU$ , lo que ha permitido a este último método ganar popularidad gracias a su aplicación en diseño asistido por ordenador.

Kays y London en 1984 mostraron que las ecuaciones que describen un intercambiador de calor se pueden escribir de manera adimensional, en tres grupos diferentes:

- Relación de la razón de capacidad:

$$C^* = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (0 \leq C^* \leq 1) \quad (B.55)$$

Donde  $C_{min}$  es la razón de capacidad calorífica menor de uno de los fluidos, y  $C_{max}$  a mayor, del otro fluido. Esta es la razón por la cual esta relación únicamente toma valores comprendidos entre 0 y 1.

- Efectividad del intercambiador de calor:

$$\varepsilon = \frac{Q'}{Q'_{max}} \quad (0 \leq \varepsilon \leq 1) \quad (B.56)$$

Que es la razón de la transferencia de calor real con respecto a la máxima transferencia de calor que puede ser posible si se tratara de un intercambiador de contraflujo.

- Número de unidades de transmisión:

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (B.57)$$

Que es una medida del tamaño del intercambiador.

La transferencia de calor real está dada por el balance de entalpía de la ecuación B.51. Obsérvese que si  $C_c > C_f$ , entonces  $(T_{1,c} - T_{2,c}) < (T_{2,f} - T_{1,f})$ , y que si  $C_c < C_f$  entonces  $(T_{1,c} - T_{1,f}) < (T_{2,f} - T_{2,c})$  y el fluido que podría experimentar el máximo cambio de temperatura,  $(T_{1,c} - T_{1,f})$ , es el fluido que tiene la razón de capacidad mínima. Así, la máxima transferencia de calor posible se puede expresar como:

$$Q'_{max} = C_f \cdot (T_{1,c} - T_{1,f}) \quad \text{si} \quad C_f < C_c \quad (B.58a)$$

O bien:

$$Q'_{max} = C_c \cdot (T_{1,c} - T_{1,f}) \quad \text{si} \quad C_f > C_c \quad (B.58b)$$

Así, se puede reescribir la efectividad como:

$$\varepsilon = \frac{Q'}{Q'_{max}} = \frac{C_c \cdot (T_{1,c} - T_{2,c})}{C_{min} \cdot (T_{1,c} - T_{1,f})} = \frac{C_f \cdot (T_{2,f} - T_{1,f})}{C_{min} \cdot (T_{1,c} - T_{1,f})} \quad (B.59)$$

Por otro lado se tiene que la efectividad es una función tal que:

$$\varepsilon = f(C^*, NTU, \text{arreglo del flujo en el intercambiador})$$

Cada arreglo de intercambiador presenta su propia relación de efectividad. La introducción formal del método  $\varepsilon - NTU$ , para intercambiadores de calor aparentemente se realizó por London y Seban (1942, 1980). Sin embargo, Sekulic et al. (1999) indican que las soluciones para el intercambiador de calor de paso simple fueron originalmente obtenidas por Nusselt (1911, 1930), Mason (1955) y Baclic and Heggs (1985). Las relaciones específicas para algunos intercambiadores aparecen en la tabla 0.4.

	General	$C^* = 1$	$NTU \rightarrow \infty$
A favor de corriente	$\varepsilon = \frac{1 - e^{-(NTU \cdot (1 - C^*))}}{(1 + C^*)}$	$\varepsilon = \frac{1}{2} (1 - e^{-2 \cdot NTU})$	$\varepsilon = \frac{1}{1 + C^*}$
A contracorriente	$\varepsilon = \frac{1 - e^{-(NTU \cdot (1 - C^*))}}{1 - C^* \cdot e^{-(NTU \cdot (1 - C^*))}}$	$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}$	$\varepsilon = 1$

**Tabla 0.4. Relaciones para la efectividad para flujo a favor de corriente y a contracorriente. Fuente: Elaboración propia**

Existen multitud de relaciones más para otras configuraciones de intercambiador, sin embargo en este trabajo se prescinde de ellas ya que no resultan útiles para nuestro cálculo.

### B.6. El proceso de transmisión de calor. General

El calor es una forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura. Al variar la temperatura de un sistema varía su energía interna. Si el estado de la materia no cambia se habla de variación de la energía interna sensible  $\Delta U$  (J), y viene dado por:

$$\Delta U = C_p m \Delta T \quad (B.60)$$

Donde  $C_p$  ( $\frac{J}{kgK}$ ), es una magnitud física conocida calor específico e inherente a cada material para unas condiciones dadas,  $m$  (kg), es la masa del sistema y  $\Delta T$  (K), la variación de la temperatura. Por el primer principio de la termodinámica se tiene que:

$$\Delta U = Q + W \quad (B.60)$$

O bien en forma de potencia:

$$U' = Q' + W' \quad (B.61)$$

La cantidad de calor transferido se representa por  $Q$  (J), mientras que la cantidad de calor transferido por unidad de tiempo se denota por  $Q'$  (W) y se conoce como velocidad de transferencia de calor o potencia calorífica. El calor total transferido en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  es la suma de la potencia calorífica en cada instante de tiempo:

$$Q = \int_0^{\Delta t} Q' dt \quad (B.62)$$

La potencia calorífica por unidad de área perpendicular a la dirección  $S$  ( $m^2$ ) de esta transferencia se llama flujo de calor,  $q'$  ( $\frac{W}{m^2}$ ):

$$q' = \frac{Q'}{S} \quad (B.63)$$

Existen tres mecanismos de transmisión de calor: la conducción, la convección y la radiación.

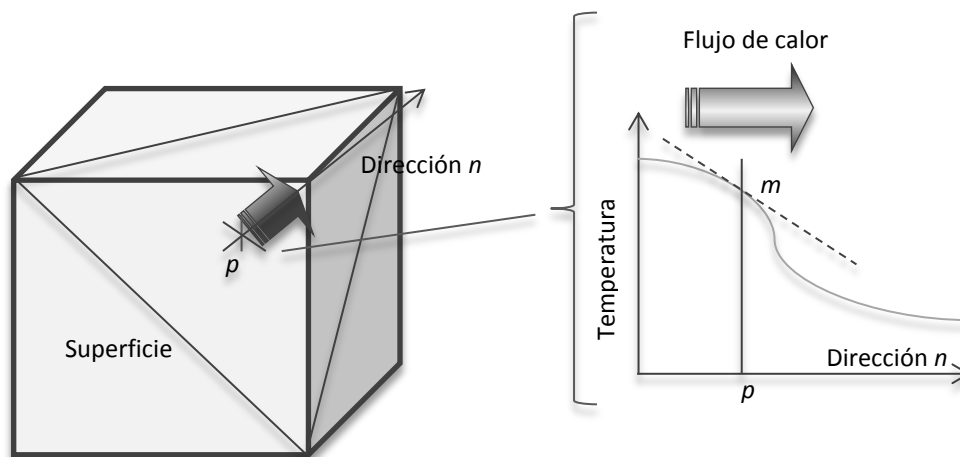
### B.7. El proceso de transmisión de calor. Conducción

La conducción de calor es un mecanismo de transmisión de calor basado en el contacto entre cuerpos que se encuentran a diferente temperatura. Es decir, se trata de un proceso de transmisión de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas. La conducción puede tener lugar en sólidos líquidos y gases.

El flujo de calor para un punto  $p$  en una dirección arbitraria dentro de un cuerpo a través de una superficie perpendicular a dicha dirección es proporcional al gradiente de temperaturas en esa misma dirección. Esta relación es conocida como Ley de Fourier y se expresa:

$$q' = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (B.64)$$

Donde el gradiente de temperaturas en la dirección  $n$  es igual, para el punto  $p$ , a la pendiente  $m$  en el gráfico dirección-temperatura, tal y como se muestra en la ilustración 0.10.



**Ilustración 0.10. Trasmisión de calor por conducción a través de una superficie aleatoria de un cuerpo. Fuente: Elaboración propia**

La constante de proporcionalidad  $k$ , se conoce como conductividad térmica.

La conductividad térmica es una medida de la capacidad de un material para conducir calor. La conductividad térmica de un material se puede definir como la velocidad de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura.

Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un valor bajo indica que es un mal conductor o que es un aislante.

La mayor parte de los materiales de ingeniería son de naturaleza isotrópica y, por tanto, tienen las mismas propiedades en todas direcciones. Aunque existen ciertos materiales anisotrópicos, como en los fibrosos o compuestos, en los que las propiedades pueden cambiar con la dirección.

Si se supone estado estacionario y geometría unidimensional, para un material isotrópico, la temperatura únicamente dependerá de una variable de posición. En el caso una pared plana como la que aparece en la ilustración 0.11, la ley de Fourier de la conducción de calor puede expresarse como:

$$Q' = -kA \frac{dT}{dx} \quad (B.64)$$

Si separamos la variable en la ecuación anterior e integramos desde  $x = 0$ , donde  $T(x = 0) = T_1$ , hasta  $x = L$ , donde  $T(x = L) = T_2$  se obtiene:

$$\int_0^L Q' dx = - \int_{T_1}^{T_2} kAdT \quad (B.65)$$

Si consideramos que  $Q' = cte$ , que es el caso en el que no existe una generación de calor propia en el interior de la pared nos da que:

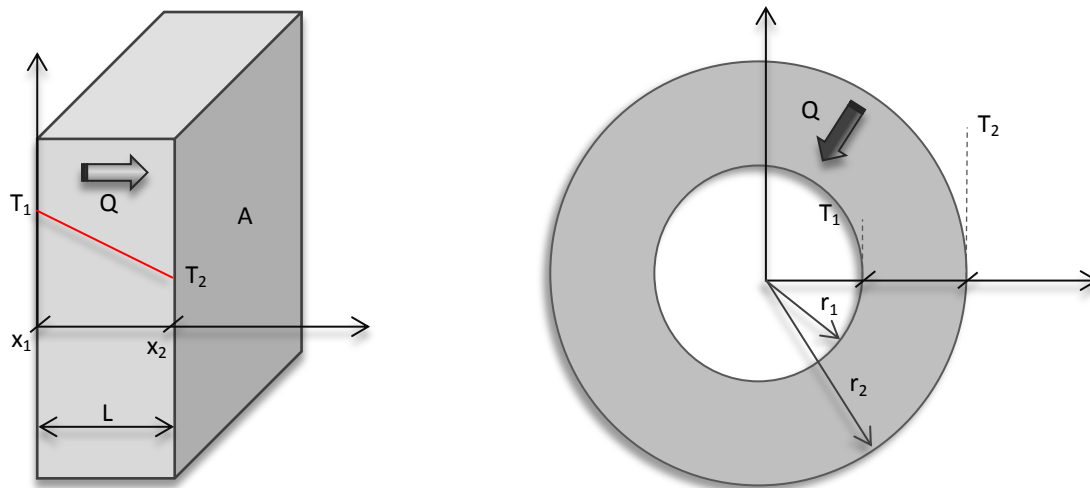
$$Q' = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (B.66)$$

Esta expresión puede reacomodarse de forma que:

$$Q' = \frac{T_1 - T_2}{R_{cond,pared}} \quad (B.67)$$

Siendo  $R_{cond,pared} = \frac{L}{k} \cdot A$ , la resistencia térmica de la pared a la conducción. La resistencia térmica de un medio depende de la configuración geométrica y de sus propiedades térmicas.

En el caso de una geometría cilíndrica como la que se muestra en la ilustración 0.11, la variable con la que cambiarán las propiedades será la  $r$ .



**Ilustración 0.11. Trasmisión de calor por conducción a través de una pared plana (izqda.) y de un cilindro (dcha.). Fuente: Elaboración propia**

En un tubo por el que circula un fluido y únicamente recibe calor en la dirección radial, la transferencia de calor es unidimensional. En este caso la temperatura del tubo dependerá sólo de una dirección (la dirección  $r$ ) y se puede expresar como  $T = T(r)$ . La temperatura es independiente del ángulo azimutal o la distancia axial.

En estado estacionario no se tiene cambio de temperatura del tubo con el tiempo, la velocidad de transferencia de calor hacia el tubo será igual a la transferencia de calor hacia fuera de él. Por ello se considera que la transferencia de calor a través del tubo es constante. De manera análoga a la pared plana tendremos:

$$Q' = -kA \frac{dT}{dr} \quad (B.68)$$

Donde  $A = 2\pi rL$ , es el área de transmisión en la ubicación  $r$ , siendo  $L$  la longitud del cilindro. Nótese que  $A$  depende de  $r$  y, en consecuencia, varía con la dirección de transferencia de calor. Si integramos desde  $r = r_1$ , donde  $T(r = r_1) = T_1$ , hasta  $r = r_2$  donde  $T(r = r_2) = T_2$  se obtiene:

$$\int_{r_1}^{r_2} \left( \frac{Q'}{2\pi rL} \right) dr = - \int_{T_1}^{T_2} k dT \quad (B.69)$$

Realizando la integral nos quedará:

$$Q' = \frac{T_1 - T_2}{R_{cond,cilindro}} \quad (B.70)$$

Y en este caso:

$$R_{cond,cilindro} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk} \quad (B.71)$$

Es la resistencia térmica de la capa cilíndrica a la conducción.

En el caso de tener múltiples capas adyacentes, tanto en geometría cartesiana (pared), como en geometría cilíndrica (tubo) y suponer estado estacionario, las propiedades no varían con el tiempo, por lo que no puede existir una acumulación de energía en ningún lugar del sistema, ya que daría lugar a una variación de la temperatura en un mismo punto con el tiempo. La energía que atravesara una capa sería igual al que atravesara la capa subsiguiente y así sucesivamente, de no ser así la energía se acumularía en un punto y ya se ha visto que esto no es factible. Por lo que para un sistema con  $n$  capas:

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{Calor que atraviesa} \\ \text{la capa 1} \end{array} \right\} = \dots = \left\{ \begin{array}{c} \text{Calor que atraviesa} \\ \text{la capa } i \end{array} \right\} = \dots = \left\{ \begin{array}{c} \text{Calor que atraviesa} \\ \text{la capa } n \end{array} \right\}$$

Es decir:

$$\frac{T_0 - T_1}{R_{cond,1}} = \dots = \frac{T_{i-1} - T_i}{R_{cond,i}} = \frac{T_{n-1} - T_n}{R_{cond,n}} \quad (B.72)$$

Siendo la resistencia de la capa  $i$  para la pared y el cilindro respectivamente:

$$R_{cond,i} = \frac{L_i}{k_i A} \quad R_{cond,i} = \frac{\ln\left(\frac{r_{i-1}}{r_i}\right)}{2\pi Lk_i} \quad (B.73)$$

La ecuación B.72 se puede reescribir:

$$Q' = \frac{T_0 - T_n}{\sum_{i=1}^n R_{cond,i}} \quad (B.74)$$

Note que no se necesita conocer las temperaturas superficiales de cada pared para evaluar la velocidad de la transferencia de calor estacionaria a través de ella. Todo lo que se necesita conocer son las temperaturas a ambos lados del sistema.

Es por tanto fácilmente comprobable que la adición de capas supone una disminución en el flujo de calor ya que aumenta la resistencia total a la conducción. En las paredes de un intercambiador después de cierto tiempo de operación se produce el ensuciamiento de las superficies. El ensuciamiento es el depósito de óxido, hollines, incrustaciones de sales minerales, sustancias orgánicas, biofilm etc. y equivale a una resistencia adicional al paso de calor, siendo necesario proceder a la limpieza de la caldera para retornar al estado inicial si esta pierde rendimiento.

La existencia de incrustaciones de sales minerales depositadas en la pared metálica del lado del agua ocasiona la elevación de la temperatura del metal sobre los valores normales. Al ser esta temperatura mayor, disminuye la diferencia entre la temperatura exterior de las paredes del intercambiador y la temperatura de los gases, disminuyendo así el calor transferido por convección y con ello el aprovechamiento de la energía del combustible.

Las incrustaciones minerales del lado del agua de la caldera dependen de la cantidad de sales minerales disueltas en el agua y de la temperatura. Por esta última razón son preferibles las calderas que trabajan a temperaturas inferiores a 60°C del lado del agua, temperatura a la cual la deposición comienza a ser importante.

### B.8. El proceso de transmisión de calor. Convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un fluido adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Cuanto más rápido es el movimiento del fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimien-

to masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido es por pura conducción. En definitiva: la convección es un fenómeno conjunto de CONDUCCIÓN+MOVIMIENTO, luego realmente no se trata de un mecanismo distinto a la conducción.

Si se considera el enfriamiento de un bloque caliente al soplar aire frío sobre su superficie superior la energía se transfiere primero a la capa de aire adyacente al bloque, por conducción. Enseguida, esta energía es acarreada alejándola de la superficie, por convección; es decir, por los efectos combinados de la conducción dentro del aire, que se debe al movimiento aleatorio de las moléculas de éste, y del movimiento masivo macroscópico de ese aire que remueve el aire calentado cercano a la superficie y lo reemplaza por otro más frío.

La convección recibe el nombre de forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Como contraste se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje, que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido.

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de transmisión de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperaturas y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton de enfriamiento como:

$$Q' = hA(T_{\infty} - T_s) \quad (B.75)$$

Donde  $T_{\infty}$  y  $T_s$  ( $^{\circ}\text{C}$  ó  $\text{K}$ ) son las temperaturas del fluido a una distancia suficiente y de la superficie respectivamente,  $A$  ( $\text{m}^2$ ), el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección y  $h$  ( $\frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2}$ ), el coeficiente de transferencia de calor por convección.

El coeficiente  $h$  no es una propiedad del fluido sino un parámetro que se determina de forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad del mismo.

En los estudios sobre convección, es práctica común quitar las dimensiones y combinar las variables, las cuales se agrupan en números adimensionales, con el fin de reducir el número de variables. Esta técnica aplicada al coeficiente de transferencia de calor  $h$  da como resultado el conocido como número de Nusselt:

$$Nu_{L_c} = \frac{hL_c}{k} \quad (B.76)$$

Siendo  $L_c$ , la longitud característica de la geometría.

El número de Nusselt representa la mejora de la transferencia de calor a través de una capa de fluido cuando existe convección respecto a cuando existe sólo conducción. Un número de Nusselt igual a la unidad para una capa de fluido representa transferencia de calor a través de esta por conducción pura.

La naturaleza del movimiento del fluido puede caracterizarse a través de otro número adimensional. El número de Reynolds nos determina si un flujo se encuentra en régimen laminar, caracterizado por líneas suaves de corriente y un movimiento intensamente ordenado o turbulento, en el que el movimiento es desordenado y se producen fluctuaciones en la velocidad. El régimen de flujo depende principalmente de la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas:

$$Re_{L_c} = \frac{v_{\infty}\rho L_c}{\mu} \quad (B.77)$$

Donde  $v_{\infty}$  es la velocidad de la corriente libre  $\mu$ , la viscosidad dinámica y  $\rho$  la densidad del fluido.

En los números grandes de Reynolds las fuerzas de inercia, son grandes en relación con las fuerzas viscosas y, estas últimas no pueden impedir las fluctuaciones aleatorias y rápidas del fluido.

También se define el número de Prandtl adimensional como:

$$Pr = \frac{\text{Difusividad molecular de la cant. de movimiento}}{\text{Difusividad molecular del calor}} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (B.78)$$

Los números de Prandtl de los fluidos van desde menos de 0.01 para los metales líquidos, hasta más de 100000 para los aceites pesados. El agua tiene un número de Prandtl del orden de 10.

Los números de Prandtl para los gases son de alrededor de 1, lo cual indica que tanto la cantidad de movimiento como el calor se disipan a través del fluido a más o menos la misma velocidad. El calor se difunde con mucha rapidez en los metales líquidos ( $Pr \ll 1$ ) y con mucha lentitud en los aceites ( $Pr \gg 1$ ) en relación con la cantidad de movimiento. Como consecuencia, la capa límite térmica es mucho más gruesa para los metales líquidos y mucho más delgada para los aceites, en relación con la capa límite de la velocidad.

Se demuestra teóricamente que, para una configuración geométrica dada, el número de Nusselt puede ponerse en función únicamente de los números de Reynolds y Prandtl. A menudo, los datos experimentales para la transfe-

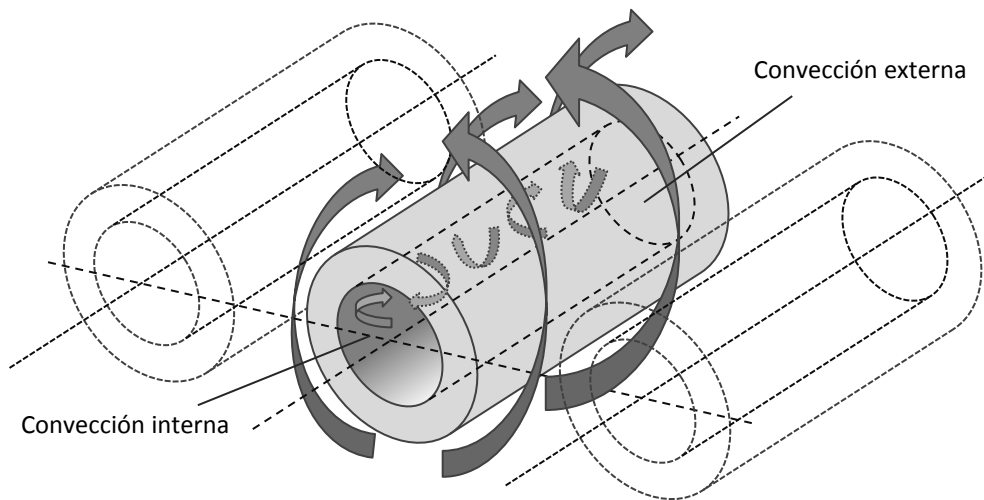
cia de calor se representan con precisión razonable mediante una simple relación de la ley de potencias de la forma:

$$Nu_{L_c} = C Re_{L_c}^s Pr^u \quad (B.79)$$

Donde  $m$  y  $n$  son exponentes constantes y el valor de la constante  $C$  depende de la configuración geométrica. Para obtener una mayor precisión, a veces se utilizan relaciones más complejas.

Existen multitud de relaciones para diferentes regímenes de flujo, geometrías y tipos de fluido, sin embargo, los siguientes puntos se centrarán en el estudio concreto de los coeficientes de transferencia de calor por convección más apropiados para el problema tratado. Con el objetivo de limitar la información dada en este capítulo se realizarán una serie de suposiciones en base a cálculos previos:

- Se supondrá régimen de flujo completamente desarrollado. Las regiones de entrada tanto térmica como hidrodinámica por parte de los dos fluidos se considerarán insignificantes frente a la longitud total del intercambiador.
- Para el fluido externo (gases de combustión) se supondrá régimen laminar.
- Para el fluido interno (agua) se supondrá régimen turbulento.



**Ilustración 0.12.** Mecanismos de convección involucrados en el problema particular de este trabajo. Fuente: Elaboración propia

Tal y como se observa en la 0.12 tenemos una convección producida al circular los gases producto de la combustión alrededor de las bobinas, que se denominará convección externa, y la generada por el agua al circular por el interior de los tubos, a la que llamaremos convección interna.

- Convección externa

Por la geometría propuesta para el intercambiador (una serie de bobinados concéntricos o una serie de espirales superpuestas) esta se puede asemejar a un banco de tubos circulares en la que el número de tubos en la dirección del flujo de gases es igual al número de espiras por bobina,  $n$  y en la dirección transversal al flujo, igual al número de bobinados concéntricos,  $l$ .

El fluido externo (los gases de combustión) circula en dirección casi transversal a la dirección de los tubos. Para un flujo transversal a un cilindro se propone la siguiente fórmula, cuyos parámetros experimentales aparecen en la tabla 0.5:

$$Nu_{d,cil} = \frac{hd}{k} = C Re_d^s Pr^{\frac{1}{3}} \quad (B.80)$$

$Re_d$	$C$	$s$
0,4-4	0,989	0,330
4-40	0,911	0,385
40-4000	0,683	0,466
4000-40000	0,193	0,618
40000-400000	0,0266	0,805

**Tabla 0.5.** Valores de los coeficientes para la ecuación B.80 en función del número de Reynolds

Donde las propiedades del fluido son evaluadas a la temperatura de película:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (B.81)$$

Siendo  $T_s$  y  $T_\infty$ , las temperaturas del fluido en contacto con la superficie (la misma que la superficie) y a una distancia suficiente respectivamente. En la evaluación del número de Reynolds para cilindros se toma el diámetro  $d$ , como longitud característica.

Los cálculos originales para estos datos fueron tomados para el aire, el cual mantenía en todo el rango un número de Prandtl casi constante e igual a 0,72.

Sin embargo cuando se tiene un banco de tubos tal y como se muestra en la ilustración 0.13 la posición relativa entre ellos modifica el flujo variando consecuentemente el coeficiente de transferencia de calor por convección.

Zakauskas presentó una fórmula empírica para el cálculo del número de Nusselt teniendo en cuenta diferentes números de Reynolds y la variación de las propiedades con la temperatura:

$$Nu_{d,banco} = \frac{hd}{k} = C Re_{d,max}^s Pr^{0,36} \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^u \quad (B.82)$$

$Re_{d,max}$	$C$	$s$
10-100	0,8	0,4
100-1000	0,52	0,5
1000-200000	0,27	0,63
>200000	0,21	0,84

**Tabla 0.6. Valores de los coeficientes para la ecuación B.82 en función del número de Reynolds**

Donde todas las propiedades son evaluadas a  $T_\infty$ , excepto  $Pr_s$  evaluada a  $T_s$ . Esta ecuación es aplicable para  $0,7 < Pr < 500$  y  $10 < Re_{d,max} < 10^6$  a gases la relación entre números de Prandtl no tiene demasiada influencia, por lo que el coeficiente  $m$ , toma el valor nulo.

Para este caso, el número de Reynolds se evalúa a la velocidad máxima  $v_{máx}$  que el fluido alcanza al atravesar el intercambiador la cual tiene lugar cuando el área frontal es mínima  $S_T - d$  y depende por tanto de la disposición de los tubos:

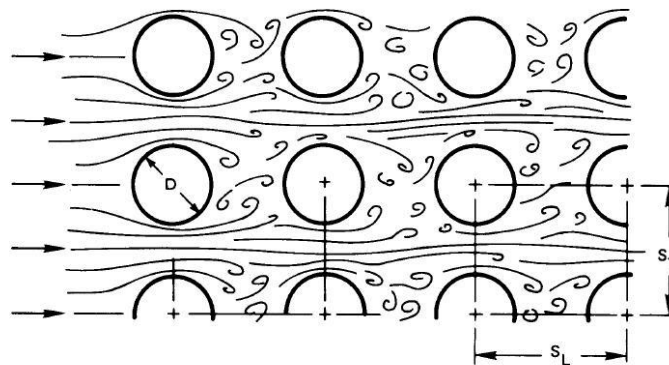
$$v_{max} = v_\infty \frac{S_T}{S_T - d} \quad (B.83)$$

Cabe destacar que para relaciones  $\frac{S_T}{S_L} < 0,7$ , la transferencia de calor es mucho menos efectiva.

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor por medio de la ecuación B.82, es exacto cuando el número de tubos en la dirección del flujo,  $n$ , es mayor o igual a 20. Para un número de tubos inferior a 20, el coeficiente calculado se ha de multiplicar por un coeficiente que aparece en la tabla 0.7.

$n$	2	3	4	5	6	8	10	16	20
$h_n/h_{20}$	0,77	0,84	0,89	0,92	0,94	0,97	0,98	0,99	1,00

**Tabla 0.7. Coeficientes de corrección para la ecuación B.82**



**Ilustración 0.13. Flujo a través de un banco de tubos**



- Convección interna

Es la generada como consecuencia de la circulación del agua por el interior de los tubos. Una relación muy común para obtener el número de Nusselt para un flujo completamente desarrollado en un tubo circular rectilíneo es la dada por Dittus y Boelter:

$$Nu_{d,lineal} = 0,023 Re_d^{0,8} Pr^u \quad (B.84)$$

$$u = \begin{cases} 0,4 & \text{para el calentamiento del fluido} \\ 0,3 & \text{para enfriamiento del fluido} \end{cases}$$

Las propiedades del fluido se toman a la temperatura media del fluido entre la entrada y la salida.

Sin embargo en nuestro problema el fluido describe trayectorias casi circulares, con lo que experimenta una aceleración adicional que mejora la transferencia de calor, frente a la circulación por un tubo recto. Para facilitar el estudio en este tipo de geometrías curvas se define la relación de radios como:

$$\vartheta = \frac{d_i}{d_c} \quad (B.84)$$

Donde  $d_i$ , es el diámetro interno del tubo y  $d_c$ , el diámetro de curvatura del canal.

Existen múltiples relaciones tanto experimentales como teóricas para predecir el número de Nusselt para el flujo turbulento en bobinas helicoidales. En cualquier caso, casi todas ellas están limitadas a flujos completamente desarrollados en el interior de la espira. La relación de Schmidt tiene el mayor rango de aplicación para bobinas helicoidales:

$$\frac{Nu_{d,helicoidal}}{Nu_{d,lineal}} = 1,0 + 3,6[1 - \vartheta]\vartheta^{0,8} \quad (B.85)$$

Esta fórmula es aplicable para  $2 \cdot 10^4 < Re_d < 1,5 \cdot 10^5$  y  $5 < 1/\vartheta < 84$ . Esta relación fue desarrollada usando agua y aire en bobinas para suposición de temperatura constante en la pared. Las propiedades se evalúan a la temperatura media del fluido. Para números de Reynolds menores se utiliza la ecuación de Pratt:

$$\frac{Nu_{d,helicoidal}}{Nu_{d,lineal}} = 1,0 + 3,4\vartheta \quad (B.86)$$

Para  $1,5 \cdot 10^3 < Re_d < 2 \cdot 10^4$ . Si se tienen en cuenta la dependencia de las propiedades con la temperatura, en especial la viscosidad para los líquidos, Orlov y Tselishev recomendaron la siguiente relación de Mikheev:

$$\frac{Nu_{d,helicoidal}}{Nu_{d,lineal}} = (1,0 + 3,4\vartheta) \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right) \quad (B.87)$$

Para  $1,5 \cdot 10^3 < Re_d < 2 \cdot 10^4$ . Evaluándose todas las propiedades a la media del fluido, excepto  $Pr_s$  que se evalúa a la temperatura de la superficie. Los únicos datos experimentales para bobinas en espiral fueron realizados por Orlov y Tselishev. En estos se indicaba que la ecuación B.85, reflejaba estos datos con un error del  $\pm 15\%$ , cuando se utilizaba el radio medio de la espira para la relación. Esto indica que la mayoría de expresiones para bobinas helicoidales puede utilizarse para bobinas en espiral si se utiliza el radio medio de estas últimas.

Considérese la transferencia de calor por convección de una superficie sólida de área  $A_s$  y temperatura  $T_s$  hacia un flujo cuya temperatura en un punto suficientemente lejos de la superficie es  $T_\infty$ , con un coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$ . La ley de Newton del enfriamiento para la velocidad de transferencia de calor por convección que viene dada en B.75, se puede reacomodar de la siguiente forma:

$$Q' = \frac{T_s - T_\infty}{R_{conv}} \quad (B.88)$$

Definiendo de manera análoga al mecanismo de conducción, la resistencia térmica a la convección,  $R_{conv}$  como:

$$R_{conv} = \frac{1}{hA_s} \quad (B.89)$$

Note que cuando el coeficiente de transferencia de calor por convección es muy grande ( $h \rightarrow \infty$ ), la resistencia a la convección se hace cero y  $T_s = T_\infty$ , es decir, la superficie no ofrece resistencia a la convección. Esta resistencia se puede sumar igualmente en la B.74. Así pues si tenemos un medio en el que existen convección a un lado de la pared, conducción a través de la pared, y convección al otro lado de la pared, la transferencia de calor vendrá dada por una ecuación análoga a la B.74:

$$Q' = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\sum_1^n R_i} \quad (B.90)$$



Donde  $T_{\infty 1}$ , y  $T_{\infty 2}$  son las temperaturas a ambos lados de la pared lo suficientemente alejadas de ésta, y la resistencia total será:

$$\sum_1^n R_i = R_{conv,1} + R_{cond} + R_{conv,2} \quad (B.91)$$

A veces resulta conveniente expresar la transferencia de calor a través de un medio de una manera análoga a la ley de Newton del enfriamiento, como:

$$Q' = UA\Delta T \quad (B.92)$$

Donde  $U$  es el coeficiente global de transferencia de calor total. La comparación de las ecuaciones anteriores revela que:

$$UA = \frac{1}{\sum_1^n R_i} \quad (B.93)$$

### B.9. El proceso de transmisión de calor. Radiación

La radiación no requiere la presencia de un medio material para llevarse a efecto. La transferencia de energía por radiación es la más rápida y no sufre atenuación en el vacío. La transferencia por radiación ocurre en los sólidos así como en los líquidos y los gases.

La transferencia de calor por conducción o convección tiene lugar en la dirección de la temperatura decreciente; es decir, de un medio a una temperatura alta hacia otro a una temperatura más baja. Resulta interesante que la transferencia de calor por radiación puede ocurrir entre dos cuerpos separados por un medio más frío que ambos. Por ejemplo, la radiación solar llega a la superficie de la Tierra después de pasar a través de capas de aire frías a grandes altitudes.

Tal y como se ha comentado en el apartado de la combustión todo cuerpo a una temperatura superior a los 0K emite radiación. Así se define cuerpo negro como un cuerpo ideal que es emisor y absorbedor perfecto en la radiación. A una temperatura y una longitud de onda específica, ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente, sin importar la longitud de onda ni la radiación. Asimismo, emite energía de radiación de manera uniforme en todas las direcciones, por unidad de área normal a la dirección de emisión. Es decir, un cuerpo negro es un emisor difuso, lo que significa que es "independiente de la dirección".

La energía de radiación emitida por un cuerpo negro por unidad de tiempo y por unidad de área superficial fue determinada de manera experimental por Stefan:

$$E_b = \sigma T^4 \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (B.94)$$

Donde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  es la constante de Stefan-Boltzmann y  $T$  la temperatura absoluta de la superficie en grados Kelvin. Esta relación fue verificada teóricamente por Boltzmann. La ecuación se conoce como ley de Stefan-Boltzmann y a  $E_b$  se llama poder de emisión de cuerpo negro.

Los cuerpos emiten, absorben y transmiten radiación en todo su volumen, sin embargo, para los cuerpos opacos como los metales, la radiación térmica es emitida o absorbida en las primeras micras de la superficie por lo que se habla de propiedades relativas a la radiación de las superficies.

Otros materiales, como el vidrio y el agua, permiten que la radiación penetre hasta profundidades considerables, antes de que tenga lugar alguna absorción significativa. La radiación a través de ese tipo de materiales semitransparentes no puede considerarse un fenómeno superficial, puesto que todo el volumen del material interactúa con la radiación.

Este último es el caso de los gases. En particular, hay dos orígenes de la radiación de los productos de una combustión hacia los sólidos que los rodean: (1) La radiación proveniente de los gases calientes propiamente y (2) la radiación de las partículas de hollín microscópicas suspendidas en estos gases. En el caso de una combustión completa de llama azul, la segunda fuente es insignificante.

La radiación proveniente de los gases no sigue la ley de Stefan-Boltzmann. Los únicos gases que emiten radiación de forma apreciable son aquellos que poseen tres o más átomos por molécula (gases triatómicos), tales como el  $\text{CO}_2$ , el  $\text{H}_2\text{O}$  y el  $\text{SO}_2$ . Una excepción es el monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), que emite radiación, pero en menor cantidad. Otros gases diatómicos como el  $\text{O}_2$ , el  $\text{N}_2$  (y su mezcla, el aire) o el  $\text{H}_2$  tienen un poder radiante despreciable.

La radiación gaseosa no sigue la ley de la cuarta potencia de las temperaturas ya que esta no se produce para todas las longitudes de onda del espectro como hacen las superficies sólidas. Cada gas únicamente emite para una estrecha franja de longitudes de onda tal y como se observa en la ilustración 0.14.

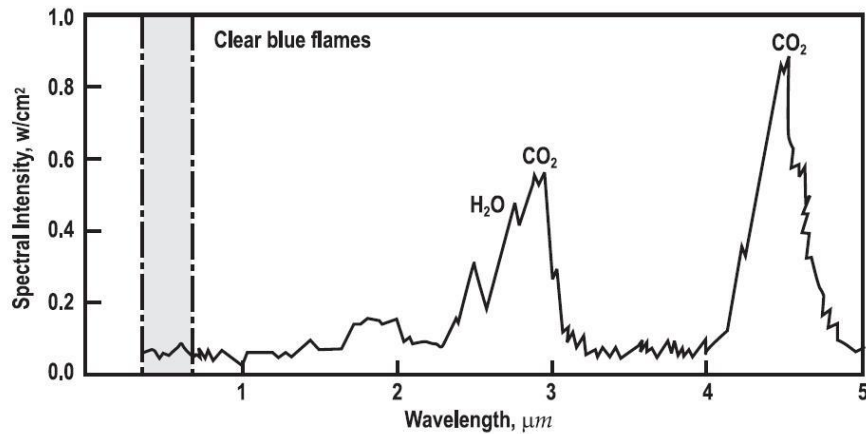


Ilustración 0.14. Intensidad de radiación varios gases en función de su longitud de onda

La radiación de estos gases depende de su temperatura, su presión parcial (% en volumen) y del espesor de la capa de gas. El cálculo de calor transmitido por la radiación de gases calientes puede obtenerse a partir de la ilustración 0.15. En ella aparece el coeficiente de transmisión de calor para gases triatómicos  $h_{gr}$  ( $Kcal/m^2h^{\circ}C$ ), en función del espesor de la capa y temperatura de gases emisores para una composición aproximada de un 12% de  $H_2O$  y 12% de  $CO_2$ . Este coeficiente es válido para una media de temperaturas entre los gases y la superficie de entre 700 y 1300°C. El calor radiante transmitido se calcula por:

$$Q'_{rad} = h_{gr} \alpha A_s (T_g - T_s) \quad (B.95)$$

Donde  $T_s$ ,  $\alpha$ , y  $A_s$  son la temperatura, la absorptividad y el área de la superficie respectivamente,  $T_g$ , la temperatura de los gases. Para la resolución del modelo se supuso una altura de la capa de gases de 10 cm y composición similar a la mostrada en la figura 0.15. Se utilizó la recta de la derecha para obtener el coeficiente en función de la temperatura de los GPC.

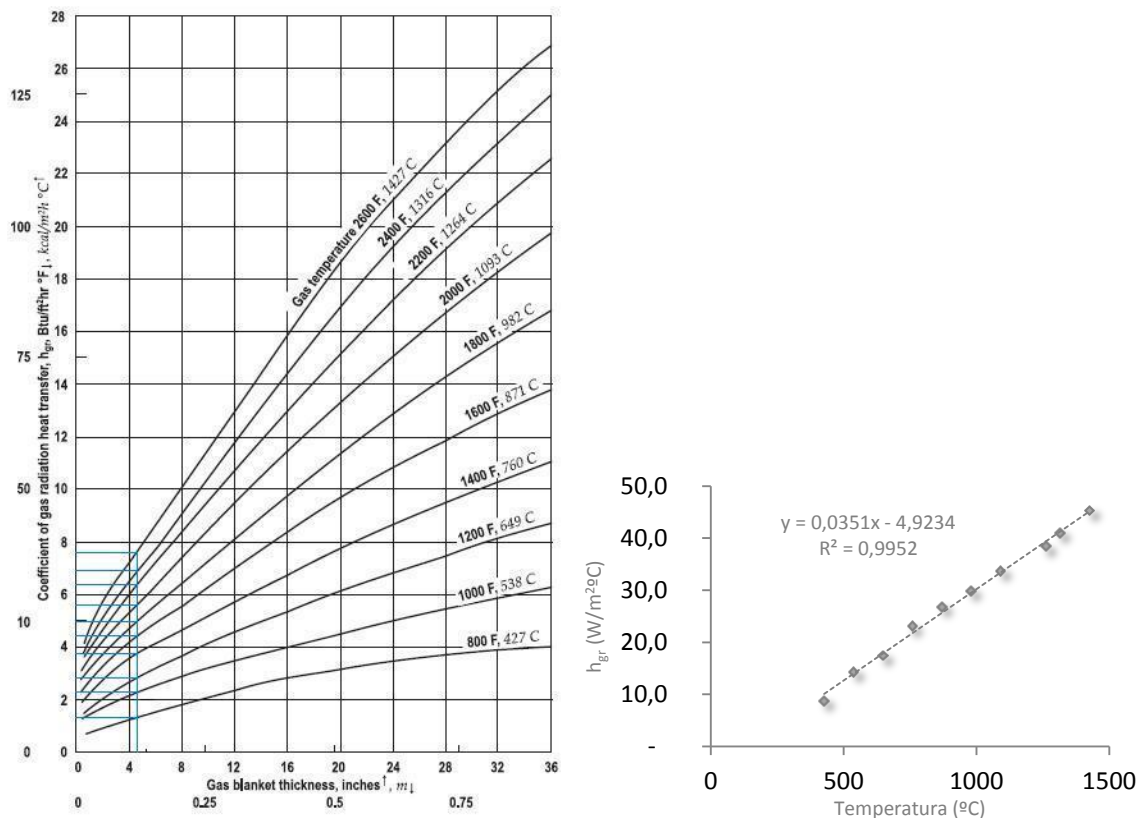
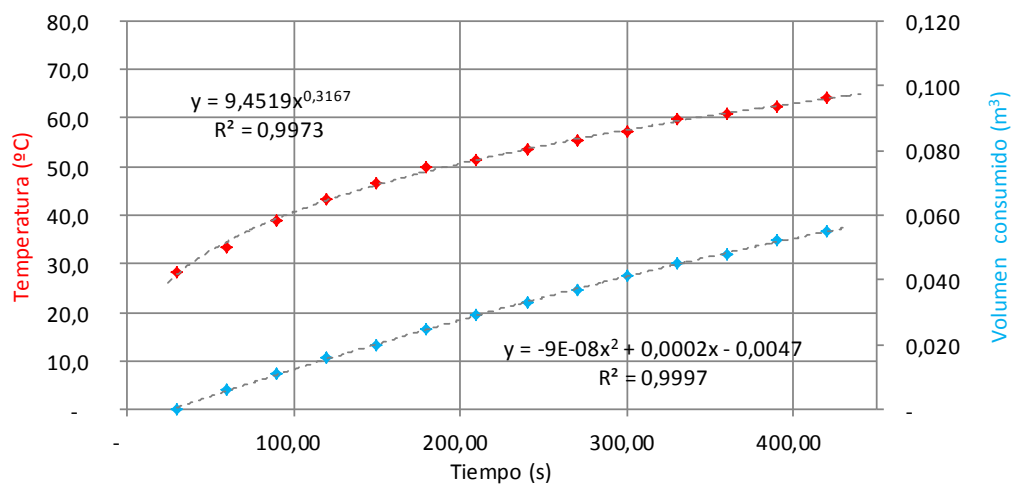


Ilustración 0.15. Coeficiente de transmisión de calor para gases triatómicos para una mezcla de 12% de  $CO_2$  y 12% de  $H_2O$  en función del espesor de la capa de gases y la temperatura (izqda.) y aproximación para una capa de 10 cm (dcha.)

## C.1. Experimento I. Cabezal del quemador

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	25/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	9:18
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	1
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	19,9
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					
t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)	
-	22,5						
30,00	28,3	4,614	-	0,00017	1,22494	4,22960	
60,00	33,5	4,620	0,006	0,00017	0,76281	4,09861	
90,00	38,8	4,625	0,011	0,00016	0,57822	3,96762	
120,00	43,3	4,630	0,016	0,00016	0,47503	3,83664	
150,00	46,7	4,634	0,020	0,00015	0,40785	3,70565	
180,00	49,8	4,639	0,025	0,00015	0,36007	3,57466	
210,00	51,5	4,643	0,029	0,00014	0,32408	3,44367	
240,00	53,5	4,647	0,033	0,00014	0,29581	3,31268	
270,00	55,4	4,651	0,037	0,00013	0,27294	3,18169	
300,00	57,1	4,655	0,041	0,00013	0,25398	3,05070	
330,00	59,6	4,659	0,045	0,00012	0,23797	2,91971	
360,00	60,7	4,662	0,048	0,00012	0,22423	2,78873	
390,00	62,5	4,666	0,052	0,00011	0,21230	2,65774	
420,00	64,2	4,669	0,055	0,00010	0,20181	2,52675	
Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)		V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
247,21	95,16	342,36		0,035	83,63	841,84	
Valores medios →				V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,099336582
				0,00014	0,338	3,4054	

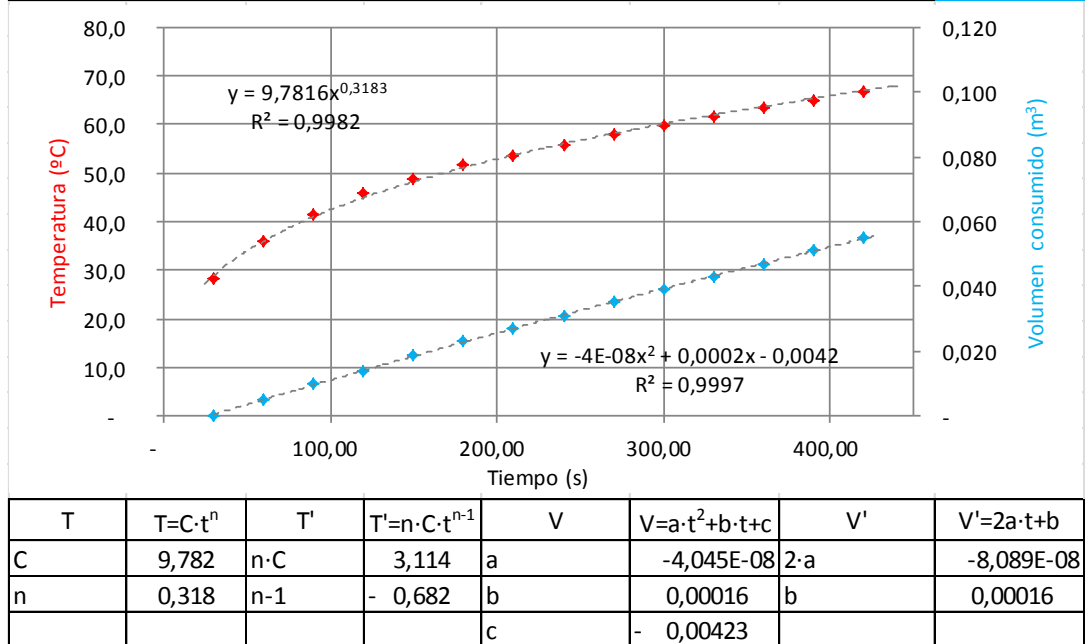


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	9,452	n·C	2,993	a	-9,005E-08	2·a	-1,801E-07
n	0,317	n-1	- 0,683	b	0,00018	b	0,00018
				c	- 0,00474		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	25/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	9:33
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	2
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	20,1
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	22,8					
30,00	28,3	4,678	-	0,00015	1,28154	3,75171
60,00	35,9	4,683	0,005	0,00015	0,79897	3,69288
90,00	41,6	4,688	0,010	0,00015	0,60604	3,63405
120,00	45,7	4,692	0,014	0,00015	0,49812	3,57521
150,00	48,8	4,697	0,019	0,00015	0,42783	3,51638
180,00	51,7	4,701	0,023	0,00014	0,37783	3,45755
210,00	53,7	4,705	0,027	0,00014	0,34015	3,39871
240,00	55,9	4,709	0,031	0,00014	0,31055	3,33988
270,00	57,9	4,713	0,035	0,00014	0,28659	3,28104
300,00	59,6	4,717	0,039	0,00013	0,26673	3,22221
330,00	61,6	4,721	0,043	0,00013	0,24995	3,16338
360,00	63,4	4,725	0,047	0,00013	0,23556	3,10454
390,00	65,0	4,729	0,051	0,00013	0,22305	3,04571
420,00	66,7	4,733	0,055	0,00012	0,21206	2,98687

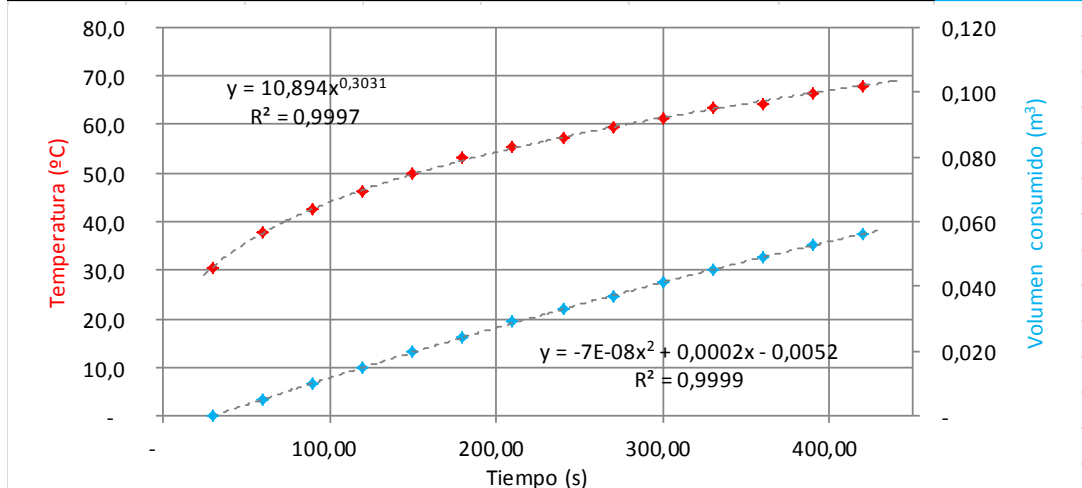
Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
214,76	83,43	298,19	0,030	83,63	737,97	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,113318335
			0,00014	0,389400305	3,43634	



Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	25/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	9:47
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	3
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	21,3
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	24,3					
30,00	30,5	4,740	-	0,00017	1,29012	4,18276
60,00	37,7	4,745	0,005	0,00017	0,79586	4,07619
90,00	42,6	4,750	0,010	0,00016	0,59995	3,96962
120,00	46,2	4,755	0,015	0,00016	0,49096	3,86305
150,00	49,8	4,760	0,020	0,00015	0,42025	3,75649
180,00	53,0	4,764	0,024	0,00015	0,37011	3,64992
210,00	55,3	4,769	0,029	0,00015	0,33241	3,54335
240,00	57,3	4,773	0,033	0,00014	0,30287	3,43679
270,00	59,5	4,777	0,037	0,00014	0,27900	3,33022
300,00	61,4	4,781	0,041	0,00013	0,25925	3,22365
330,00	63,4	4,785	0,045	0,00013	0,24259	3,11709
360,00	64,3	4,789	0,049	0,00012	0,22831	3,01052
390,00	66,5	4,793	0,053	0,00012	0,21593	2,90395
420,00	67,8	4,796	0,056	0,00012	0,20506	2,79738

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
205,38	73,07	278,46	0,031	83,63	752,72	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,111098255
			0,00015	0,407170713	3,66496	

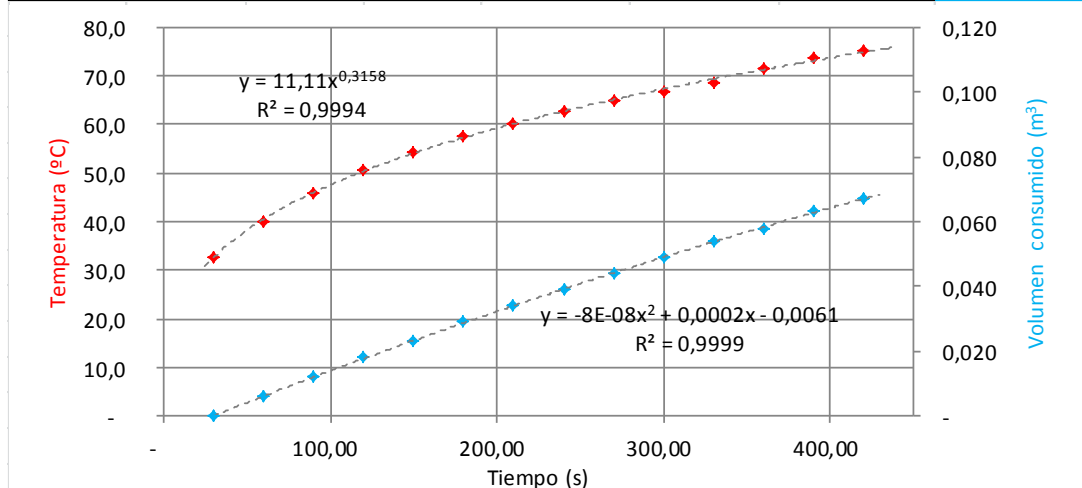


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	10,894	n·C	3,302	a	-7,326E-08	2·a	-1,465E-07
n	0,303	n-1	- 0,697	b	0,00018	b	0,00018
				c	- 0,00524		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	25/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	10:03
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>2</sub>	Nº Prueba	4
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	22,1
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	24,3					
30,00	32,7	4,805	-	0,00020	1,43131	4,92084
60,00	40,0	4,811	0,006	0,00020	0,89076	4,80429
90,00	46,0	4,817	0,012	0,00019	0,67495	4,68773
120,00	50,6	4,823	0,018	0,00019	0,55436	4,57117
150,00	54,2	4,828	0,023	0,00018	0,47586	4,45461
180,00	57,6	4,834	0,029	0,00018	0,42005	4,33806
210,00	60,3	4,839	0,034	0,00017	0,37800	4,22150
240,00	62,7	4,844	0,039	0,00017	0,34500	4,10494
270,00	64,8	4,849	0,044	0,00016	0,31829	3,98838
300,00	66,7	4,854	0,049	0,00016	0,29615	3,87182
330,00	68,7	4,859	0,054	0,00015	0,27745	3,75527
360,00	71,6	4,863	0,058	0,00015	0,26141	3,63871
390,00	73,5	4,868	0,063	0,00015	0,24748	3,52215
420,00	75,1	4,872	0,067	0,00014	0,23525	3,40559

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
150,88	57,78	208,66	0,028	83,63	681,95	0,122627125
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	
			0,00019	0,554249154	4,51979	

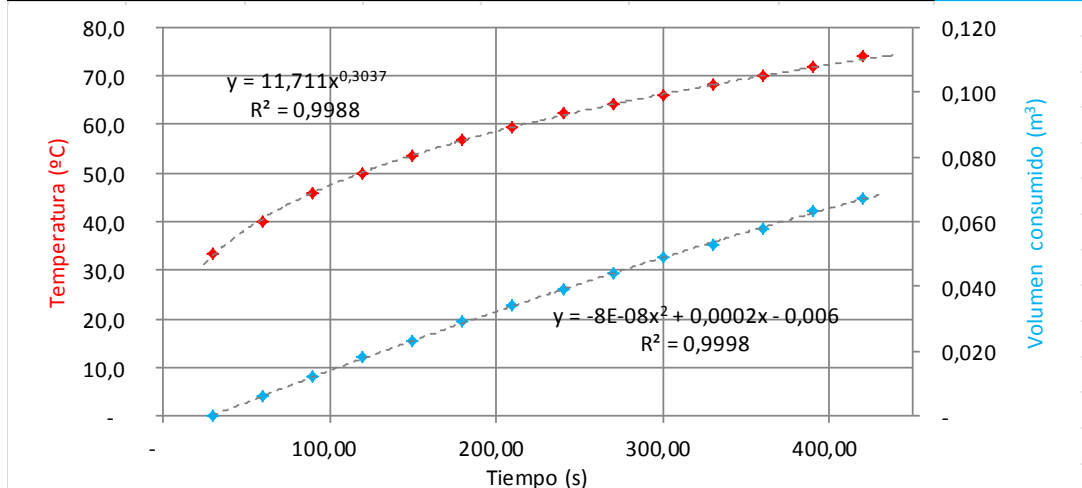


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	11,110	n·C	3,508	a	-8,013E-08	2·a	-1,603E-07
n	0,316	n-1	- 0,684	b	0,00021	b	0,00021
				c	- 0,00609		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	25/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quegador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	10:21
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>2</sub>	Nº Prueba	5
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	22,3
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	26,4					
30,00	33,5	4,882	-	0,00020	1,39272	4,89398
60,00	39,9	4,888	0,006	0,00020	0,85953	4,77964
90,00	45,7	4,894	0,012	0,00019	0,64811	4,66530
120,00	49,9	4,900	0,018	0,00019	0,53046	4,55097
150,00	53,4	4,905	0,023	0,00018	0,45413	4,43663
180,00	56,9	4,911	0,029	0,00018	0,39999	4,32229
210,00	59,5	4,916	0,034	0,00017	0,35928	4,20795
240,00	62,2	4,921	0,039	0,00017	0,32738	4,09362
270,00	64,0	4,926	0,044	0,00016	0,30160	3,97928
300,00	65,9	4,931	0,049	0,00016	0,28027	3,86494
330,00	68,2	4,935	0,053	0,00015	0,26227	3,75060
360,00	70,0	4,940	0,058	0,00015	0,24685	3,63627
390,00	71,8	4,945	0,063	0,00015	0,23347	3,52193
420,00	73,9	4,949	0,067	0,00014	0,22173	3,40759

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
159,83	57,08	216,91	0,030	83,63	717,04	0,116626551
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	
			0,00019	0,523208708	4,48619	

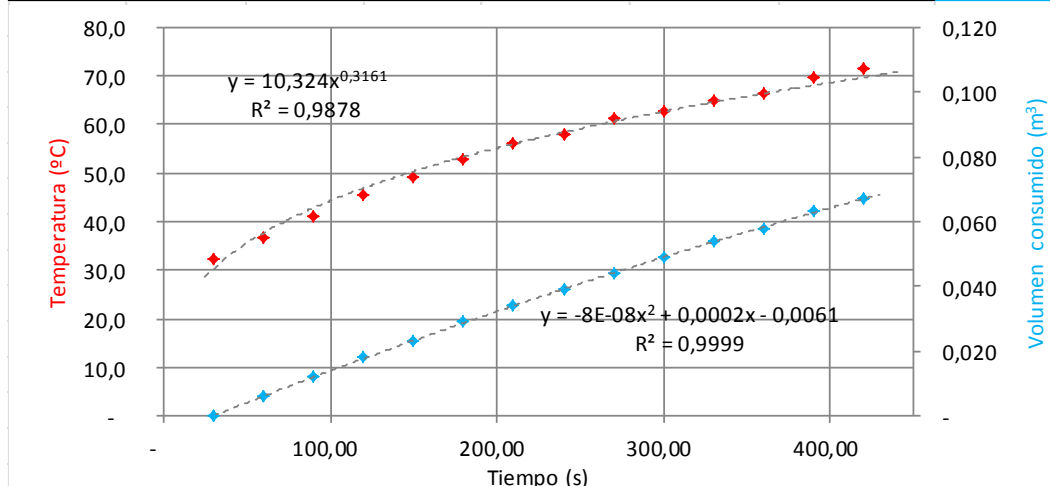


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	11,711	n·C	3,557	a	-7,860E-08	2·a	-1,572E-07
n	0,304	n-1	- 0,696	b	0,00021	b	0,00021
				c	- 0,00599		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	25/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	10:49
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>2</sub>	Nº Prueba	6
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	23
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	24,5					
30,00	32,3	4,957	-	0,00020	1,33307	4,92084
60,00	36,8	4,963	0,006	0,00020	0,82982	4,80429
90,00	41,0	4,969	0,012	0,00019	0,62887	4,68773
120,00	45,6	4,975	0,018	0,00019	0,51656	4,57117
150,00	49,1	4,980	0,023	0,00018	0,44345	4,45461
180,00	52,9	4,986	0,029	0,00018	0,39147	4,33806
210,00	56,2	4,991	0,034	0,00017	0,35230	4,22150
240,00	58,1	4,996	0,039	0,00017	0,32155	4,10494
270,00	61,1	5,001	0,044	0,00016	0,29667	3,98838
300,00	62,7	5,006	0,049	0,00016	0,27604	3,87182
330,00	64,9	5,011	0,054	0,00015	0,25862	3,75527
360,00	66,2	5,015	0,058	0,00015	0,24368	3,63871
390,00	69,7	5,020	0,063	0,00015	0,23070	3,52215
420,00	71,6	5,024	0,067	0,00014	0,21930	3,40559

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
189,09	72,56	261,65	0,034	83,63	829,76	0,100783283
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	
			0,00018	0,442253284	4,38816	



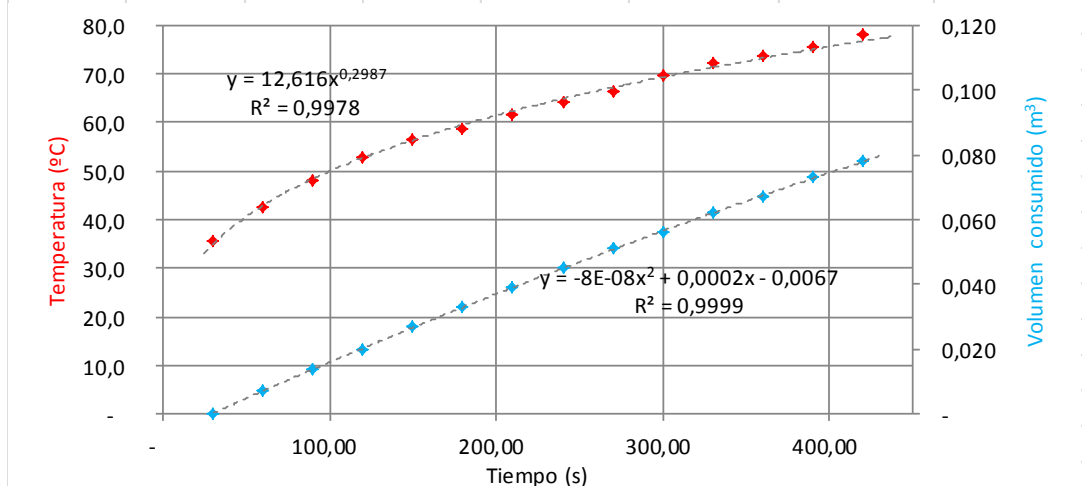
T	T=C·t <sup>n</sup>	T'	T'=n·C·t <sup>n-1</sup>	V	V=a·t²+b·t+c	V'	V'=2a·t+b
C	10,324	n·C	3,264	a	-8,013E-08	2·a	-1,603E-07
n	0,316	n-1	- 0,684	b	0,00021	b	0,00021
				c	- 0,00609		



Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	25/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quegador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	11:33
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>3</sub>	Nº Prueba	7
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	24,2
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	24,3					
30,00	35,5	5,034	-	0,00023	1,45098	5,56713
60,00	42,5	5,041	0,007	0,00022	0,89240	5,45279
90,00	48,2	5,048	0,014	0,00022	0,67154	5,33845
120,00	52,8	5,054	0,020	0,00022	0,54885	5,22412
150,00	56,3	5,061	0,027	0,00021	0,46935	5,10978
180,00	58,7	5,067	0,033	0,00021	0,41302	4,99544
210,00	61,5	5,073	0,039	0,00020	0,37070	4,88110
240,00	64,1	5,079	0,045	0,00020	0,33756	4,76677
270,00	66,5	5,085	0,051	0,00019	0,31080	4,65243
300,00	69,6	5,090	0,056	0,00019	0,28866	4,53809
330,00	72,1	5,096	0,062	0,00018	0,27000	4,42375
360,00	73,7	5,101	0,067	0,00018	0,25402	4,30942
390,00	75,4	5,107	0,073	0,00017	0,24015	4,19508
420,00	77,9	5,112	0,078	0,00017	0,22799	4,08074

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
137,33	47,59	184,92	0,030	83,63	719,40	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,116243474
			0,00022	0,608927183	5,23838	

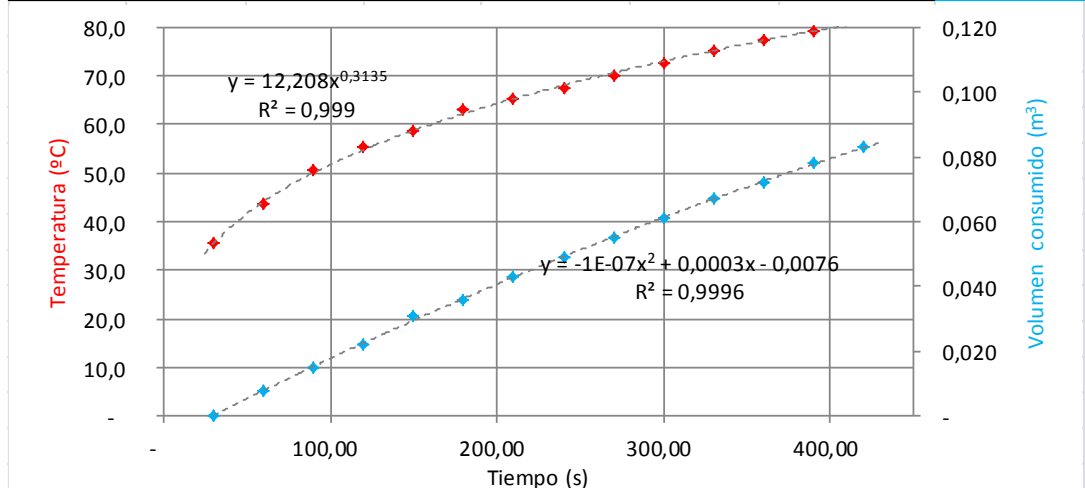


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	12,616	n·C	3,769	a	-7,860E-08	2·a	-1,572E-07
n	0,299	n-1	- 0,701	b	0,00023	b	0,00023
				c	- 0,00674		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	25/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	12:00
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>3</sub>	Nº Prueba	8
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	24,4
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	26,3					
30,00	35,4	5,124	-	0,00026	1,54926	6,25859
60,00	43,5	5,132	0,008	0,00025	0,96264	6,08542
90,00	50,5	5,139	0,015	0,00024	0,72874	5,91225
120,00	55,4	5,146	0,022	0,00024	0,59814	5,73908
150,00	58,8	5,155	0,031	0,00023	0,51318	5,56591
180,00	62,9	5,160	0,036	0,00022	0,45281	5,39274
210,00	65,4	5,167	0,043	0,00022	0,40734	5,21956
240,00	67,4	5,173	0,049	0,00021	0,37166	5,04639
270,00	70,0	5,179	0,055	0,00020	0,34279	4,87322
300,00	72,5	5,185	0,061	0,00019	0,31887	4,70005
330,00	75,0	5,191	0,067	0,00019	0,29867	4,52688
360,00	77,3	5,196	0,072	0,00018	0,28135	4,35371
390,00	79,2	5,202	0,078	0,00017	0,26631	4,18054
420,00	81,6	5,207	0,083	0,00017	0,25310	4,00736

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
116,56	44,07	160,63	0,028	83,63	680,84	0,122827956
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	
			0,00024	0,717434968	5,84097	

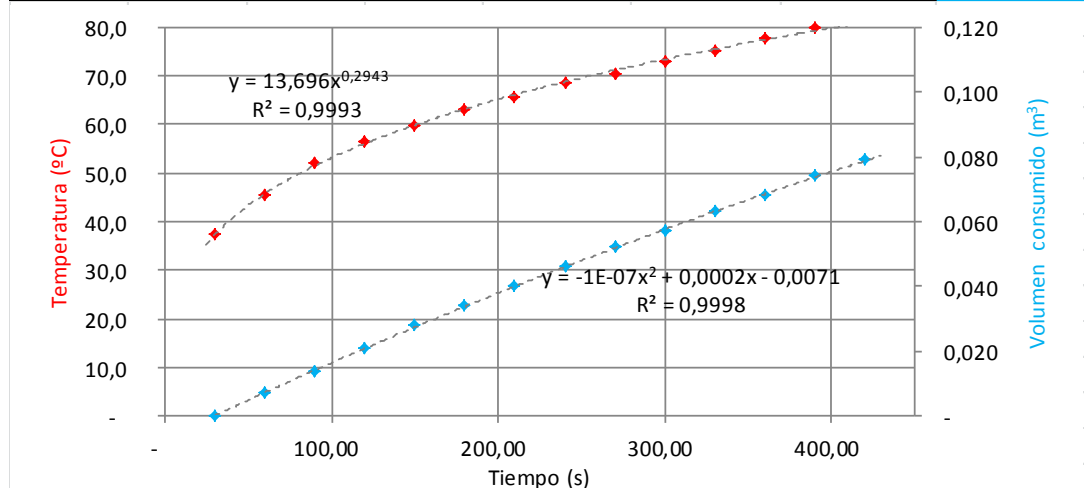


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	12,208	n·C	3,827	a	-1,190E-07	2·a	-2,381E-07
n	0,313	n-1	- 0,687	b	0,00027	b	0,00027
				c	- 0,00764		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	25/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	12:13
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>3</sub>	Nº Prueba	9
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	24,4
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	26,2					
30,00	37,4	5,222	-	0,00024	1,52886	5,78448
60,00	45,4	5,229	0,007	0,00023	0,93742	5,64572
90,00	51,9	5,236	0,014	0,00023	0,70416	5,50696
120,00	56,3	5,243	0,021	0,00022	0,57479	5,36820
150,00	59,9	5,250	0,028	0,00022	0,49104	5,22944
180,00	62,9	5,256	0,034	0,00021	0,43176	5,09068
210,00	65,6	5,262	0,040	0,00020	0,38726	4,95193
240,00	68,6	5,268	0,046	0,00020	0,35243	4,81317
270,00	70,5	5,274	0,052	0,00019	0,32432	4,67441
300,00	73,1	5,279	0,057	0,00019	0,30108	4,53565
330,00	75,3	5,285	0,063	0,00018	0,28150	4,39689
360,00	77,6	5,290	0,068	0,00018	0,26473	4,25813
390,00	79,9	5,296	0,074	0,00017	0,25020	4,11937
420,00	81,8	5,301	0,079	0,00016	0,23745	3,98061

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
113,12	38,15	151,27	0,026	83,63	620,49	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,134774908
			0,00023	0,739267047	5,48520	

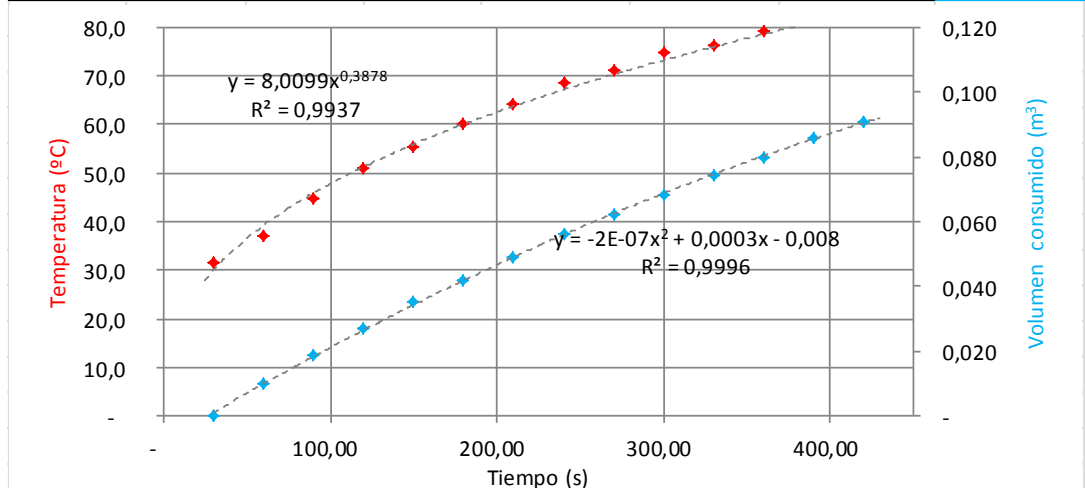


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	13,696	n·C	4,031	a	-9,539E-08	2·a	-1,908E-07
n	0,294	n-1	- 0,706	b	0,00024	b	0,00024
				c	- 0,00710		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	26/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	9:35
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>4</sub>	Nº Prueba	10
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	21
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	22,9					
30,00	31,5	5,314	-	0,00030	1,61925	7,23146
60,00	37,2	5,324	0,010	0,00029	1,05933	6,97392
90,00	44,7	5,333	0,019	0,00028	0,82648	6,71639
120,00	50,8	5,341	0,027	0,00027	0,69302	6,45885
150,00	55,3	5,349	0,035	0,00026	0,60453	6,20131
180,00	60,3	5,356	0,042	0,00025	0,54069	5,94378
210,00	64,2	5,363	0,049	0,00023	0,49200	5,68624
240,00	68,4	5,370	0,056	0,00022	0,45338	5,42870
270,00	71,0	5,376	0,062	0,00021	0,42184	5,17117
300,00	74,6	5,382	0,068	0,00020	0,39549	4,91363
330,00	76,1	5,388	0,074	0,00019	0,37308	4,65609
360,00	79,1	5,394	0,080	0,00018	0,35372	4,39855
390,00	80,2	5,400	0,086	0,00017	0,33681	4,14102
420,00	82,3	5,405	0,091	0,00016	0,32187	3,88348

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
116,64	63,23	179,87	0,031	83,63	751,82	0,111231588
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	
			0,00027	0,716949991	6,44556	

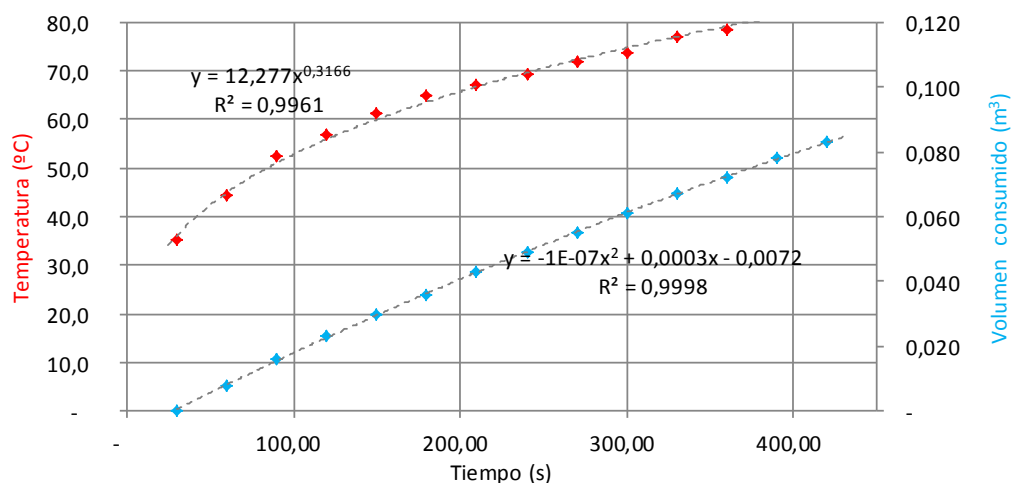


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	8,010	n·C	3,106	a	-1,770E-07	2·a	-3,541E-07
n	0,388	n-1	- 0,612	b	0,00031	b	0,00031
				c	- 0,00802		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	26/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quegador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	9:50
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>4</sub>	Nº Prueba	11
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	22,3
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	23,8					
30,00	35,1	5,416	-	0,00026	1,59042	6,20298
60,00	44,5	5,424	0,008	0,00025	0,99037	6,03536
90,00	52,3	5,432	0,016	0,00024	0,75069	5,86774
120,00	56,8	5,439	0,023	0,00024	0,61671	5,70012
150,00	61,3	5,446	0,030	0,00023	0,52949	5,53249
180,00	64,9	5,452	0,036	0,00022	0,46746	5,36487
210,00	67,0	5,459	0,043	0,00021	0,42072	5,19725
240,00	69,1	5,465	0,049	0,00021	0,38403	5,02963
270,00	71,9	5,471	0,055	0,00020	0,35433	4,86201
300,00	73,6	5,477	0,061	0,00019	0,32971	4,69439
330,00	76,9	5,483	0,067	0,00019	0,30892	4,52677
360,00	78,3	5,488	0,072	0,00018	0,29109	4,35915
390,00	80,5	5,494	0,078	0,00017	0,27559	4,19153
420,00	82,8	5,499	0,083	0,00017	0,26199	4,02390

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
108,37	41,70	150,07	0,026	83,63	632,31	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,132254605
			0,00024	0,771687278	5,83486	

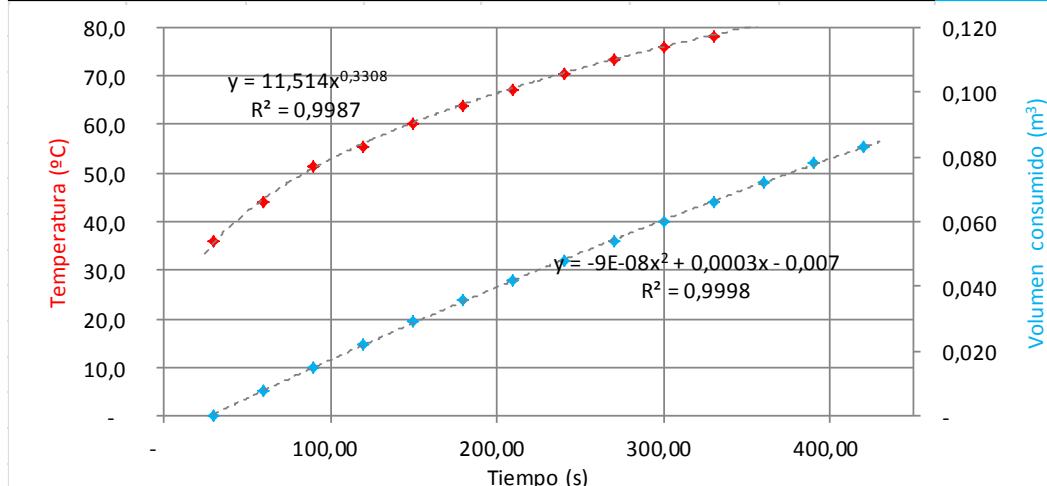


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	12,277	n·C	3,887	a	-1,152E-07	2·a	-2,305E-07
n	0,317	n-1	- 0,683	b	0,00026	b	0,00026
				c	- 0,00725		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	26/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	10:05
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>4</sub>	Nº Prueba	12
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	23
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	26,1					
30,00	36,1	5,514	-	0,00025	1,63520	5,96109
60,00	44,0	5,522	0,008	0,00024	1,02830	5,83232
90,00	51,3	5,529	0,015	0,00024	0,78393	5,70356
120,00	55,5	5,536	0,022	0,00023	0,64665	5,57479
150,00	60,1	5,543	0,029	0,00022	0,55695	5,44602
180,00	63,8	5,550	0,036	0,00022	0,49297	5,31725
210,00	67,2	5,556	0,042	0,00021	0,44465	5,18848
240,00	70,3	5,562	0,048	0,00021	0,40664	5,05971
270,00	73,4	5,568	0,054	0,00020	0,37582	4,93095
300,00	75,9	5,574	0,060	0,00020	0,35024	4,80218
330,00	78,0	5,580	0,066	0,00019	0,32859	4,67341
360,00	81,3	5,586	0,072	0,00019	0,31001	4,54464
390,00	83,0	5,592	0,078	0,00018	0,29384	4,41587
420,00	86,3	5,597	0,083	0,00018	0,27962	4,28710

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
103,86	43,15	147,01	0,024	83,63	590,09	0,141716385
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	
			0,00023	0,805195976	5,68174	

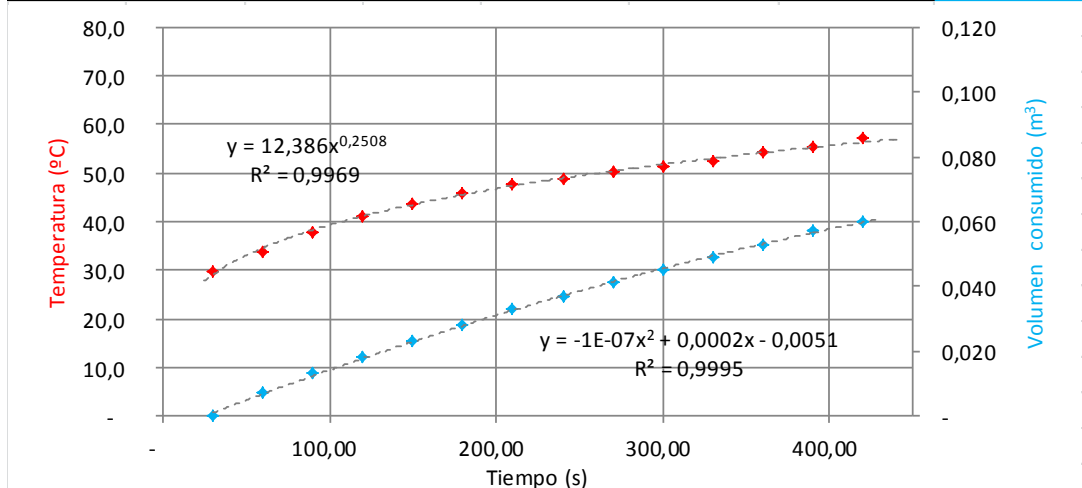


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	11,514	n·C	3,809	a	-8,852E-08	2·a	-1,770E-07
n	0,331	n-1	- 0,669	b	0,00025	b	0,00025
				c	- 0,00696		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	23/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quegador	QS <sub>1</sub>	Hora	10:07
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	13
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	19,3
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	24,3					
30,00	29,7	3,347	-	0,00020	1,01565	4,79163
60,00	33,9	3,354	0,007	0,00019	0,60422	4,61735
90,00	37,9	3,360	0,013	0,00018	0,44593	4,44307
120,00	40,9	3,365	0,018	0,00018	0,35946	4,26879
150,00	43,5	3,370	0,023	0,00017	0,30412	4,09451
180,00	45,7	3,375	0,028	0,00016	0,26529	3,92022
210,00	47,8	3,380	0,033	0,00015	0,23635	3,74594
240,00	48,8	3,384	0,037	0,00015	0,21385	3,57166
270,00	50,4	3,388	0,041	0,00014	0,19579	3,39738
300,00	51,5	3,392	0,045	0,00013	0,18092	3,22310
330,00	52,5	3,396	0,049	0,00013	0,16845	3,04882
360,00	54,3	3,400	0,053	0,00012	0,15782	2,87453
390,00	55,3	3,404	0,057	0,00011	0,14864	2,70025
420,00	57,3	3,407	0,060	0,00010	0,14061	2,52597

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
433,13	107,27	540,40	0,055	83,63	1.336,06	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,062591554
			0,00013	0,193072851	3,08465	

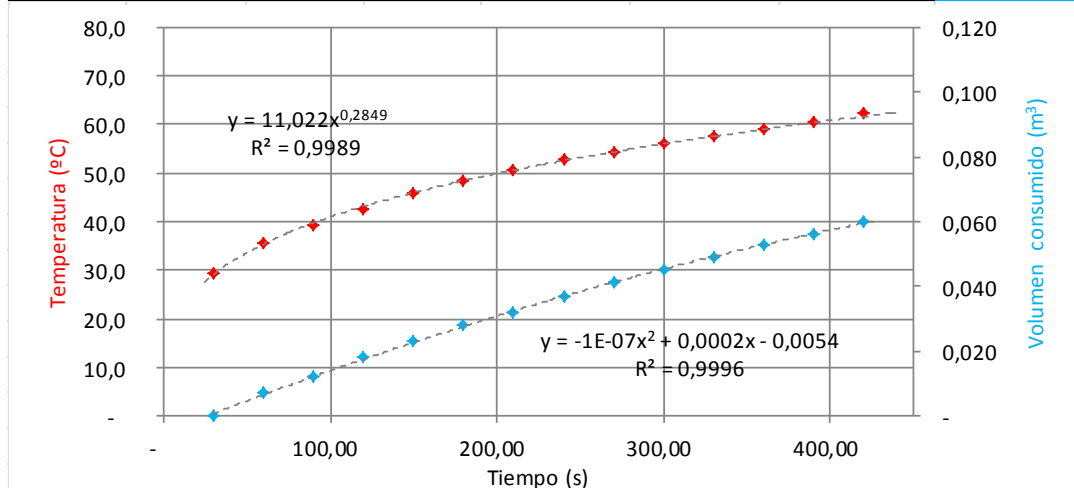


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	12,386	n·C	3,106	a	-1,198E-07	2·a	-2,396E-07
n	0,251	n-1	- 0,749	b	0,00020	b	0,00020
				c	- 0,00513		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	23/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1</sub>	Hora	10:23
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	14
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	20,5
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	24,3					
30,00	29,5	3,417	-	0,00020	1,15381	4,79707
60,00	35,4	3,424	0,007	0,00019	0,70288	4,62168
90,00	39,2	3,429	0,012	0,00018	0,52598	4,44629
120,00	42,6	3,435	0,018	0,00018	0,42819	4,27090
150,00	45,7	3,440	0,023	0,00017	0,36504	4,09550
180,00	48,4	3,445	0,028	0,00016	0,32042	3,92011
210,00	50,5	3,449	0,032	0,00015	0,28698	3,74472
240,00	52,7	3,454	0,037	0,00015	0,26084	3,56933
270,00	54,3	3,458	0,041	0,00014	0,23977	3,39394
300,00	56,1	3,462	0,045	0,00013	0,22237	3,21855
330,00	57,6	3,466	0,049	0,00013	0,20772	3,04315
360,00	59,0	3,470	0,053	0,00012	0,19519	2,86776
390,00	60,5	3,473	0,056	0,00011	0,18434	2,69237
420,00	62,2	3,477	0,060	0,00010	0,17482	2,51698

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
290,22	92,15	382,37	0,043	83,63	1.040,53	0,080368714
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	
			0,00015	0,288149003	3,58534	



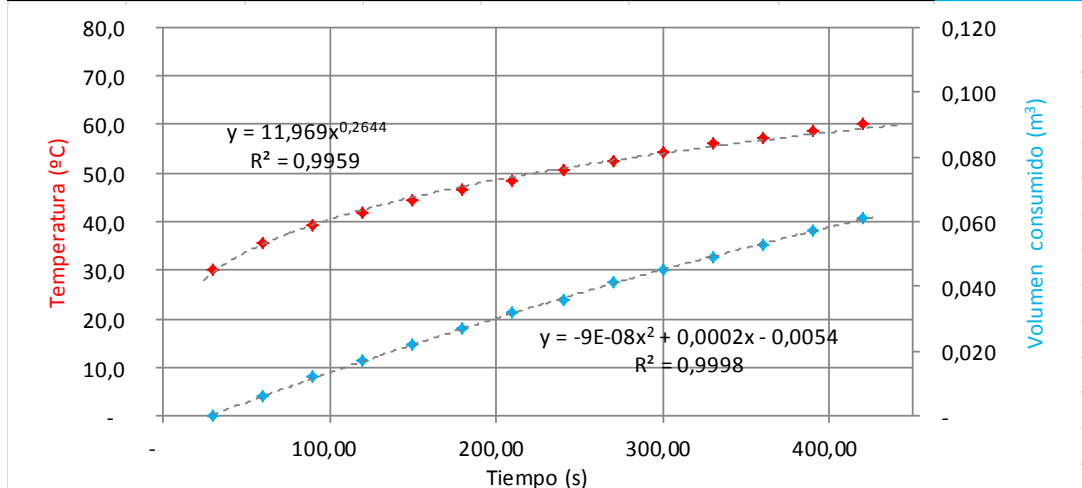
T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	11,022	n·C	3,141	a	-1,206E-07	2·a	-2,411E-07
n	0,285	n-1	- 0,715	b	0,00021	b	0,00021
				c	- 0,00535		



Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	23/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quegador	QS <sub>1</sub>	Hora	10:41
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	15
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	21
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	24,9					
30,00	29,9	3,486	-	0,00019	1,08404	4,63156
60,00	35,7	3,492	0,006	0,00019	0,65104	4,49502
90,00	39,3	3,498	0,012	0,00018	0,48314	4,35848
120,00	41,9	3,503	0,017	0,00017	0,39099	4,22194
150,00	44,3	3,508	0,022	0,00017	0,33180	4,08540
180,00	46,5	3,513	0,027	0,00016	0,29016	3,94886
210,00	48,3	3,518	0,032	0,00016	0,25905	3,81232
240,00	50,5	3,522	0,036	0,00015	0,23482	3,67579
270,00	52,3	3,527	0,041	0,00015	0,21533	3,53925
300,00	54,1	3,531	0,045	0,00014	0,19927	3,40271
330,00	56,0	3,535	0,049	0,00013	0,18578	3,26617
360,00	57,3	3,539	0,053	0,00013	0,17426	3,12963
390,00	58,8	3,543	0,057	0,00012	0,16429	2,99309
420,00	60,2	3,547	0,061	0,00012	0,15558	2,85655

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
348,61	95,91	444,53	0,051	83,63	1.233,48	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,067796743
			0,00015	0,239881706	3,53825	

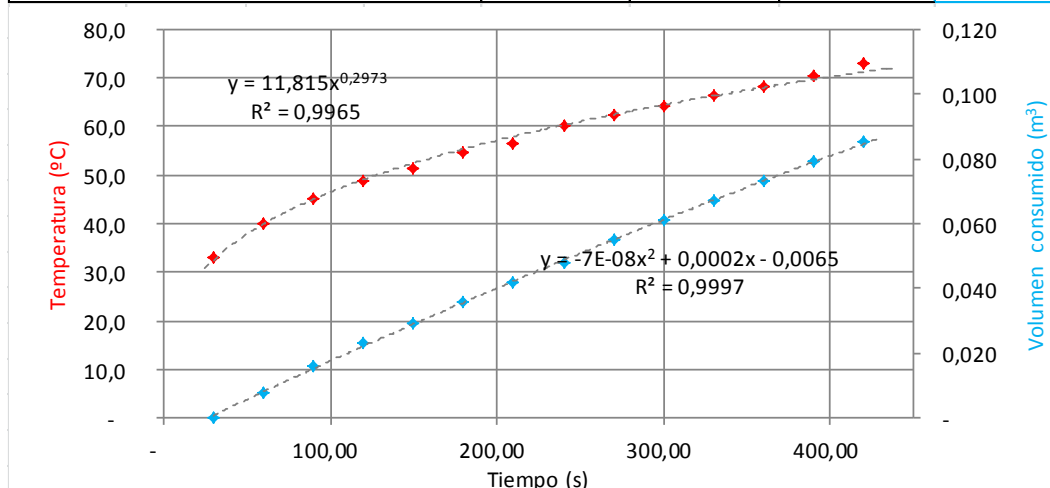


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	11,969	n·C	3,165	a	-9,386E-08	2·a	-1,877E-07
n	0,264	n-1	- 0,736	b	0,00020	b	0,00020
				c	- 0,00541		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	23/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1</sub>	Hora	11:05
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>2</sub>	Nº Prueba	16
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	22
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	25,4					
30,00	33,1	3,558	-	0,00024	1,34578	5,88949
60,00	39,9	3,566	0,008	0,00024	0,82687	5,78404
90,00	45,2	3,574	0,016	0,00023	0,62187	5,67858
120,00	48,7	3,581	0,023	0,00023	0,50805	5,57312
150,00	51,5	3,587	0,029	0,00023	0,43432	5,46767
180,00	54,5	3,594	0,036	0,00022	0,38209	5,36221
210,00	56,6	3,600	0,042	0,00022	0,34286	5,25675
240,00	60,1	3,606	0,048	0,00021	0,31215	5,15129
270,00	62,5	3,613	0,055	0,00021	0,28736	5,04584
300,00	64,3	3,619	0,061	0,00020	0,26685	4,94038
330,00	66,2	3,625	0,067	0,00020	0,24957	4,83492
360,00	68,3	3,631	0,073	0,00020	0,23476	4,72947
390,00	70,5	3,637	0,079	0,00019	0,22192	4,62401
420,00	73,1	3,643	0,085	0,00019	0,21066	4,51855

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
175,99	60,45	236,45	0,040	83,63	963,22	0,086819205
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	
			0,00023	0,47517162	5,47312	

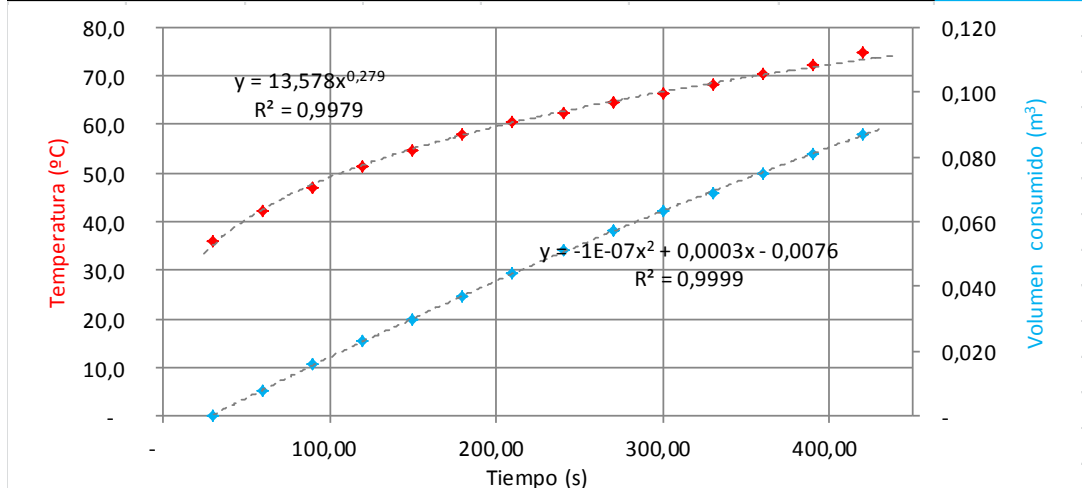


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	11,815	n·C	3,513	a	-7,250E-08	2·a	-1,450E-07
n	0,297	n-1	- 0,703	b	0,00025	b	0,00025
				c	- 0,00648		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	23/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quegador	QS <sub>1</sub>	Hora	11:32
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>2</sub>	Nº Prueba	17
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	22,1
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	28,5					
30,00	35,8	3,655	-	0,00026	1,36411	6,30733
60,00	42,2	3,663	0,008	0,00025	0,82759	6,16191
90,00	47,0	3,671	0,016	0,00025	0,61782	6,01649
120,00	51,3	3,678	0,023	0,00024	0,50209	5,87107
150,00	54,7	3,685	0,030	0,00024	0,42748	5,72565
180,00	57,9	3,692	0,037	0,00023	0,37482	5,58023
210,00	60,6	3,699	0,044	0,00022	0,33540	5,43481
240,00	62,4	3,706	0,051	0,00022	0,30461	5,28939
270,00	64,5	3,712	0,057	0,00021	0,27982	5,14397
300,00	66,2	3,718	0,063	0,00021	0,25935	4,99855
330,00	68,3	3,724	0,069	0,00020	0,24212	4,85313
360,00	70,2	3,730	0,075	0,00019	0,22740	4,70771
390,00	72,3	3,736	0,081	0,00019	0,21465	4,56229
420,00	74,6	3,742	0,087	0,00012	0,20348	2,98687

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
157,40	48,04	205,44	0,038	83,63	918,94	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,091002192
			0,00024	0,531307729	5,83841	

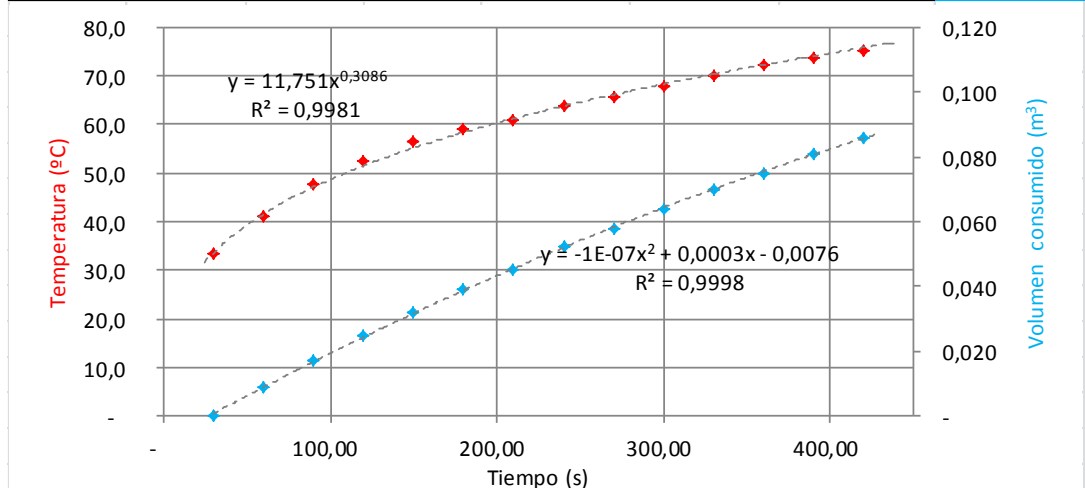


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	13,578	n·C	3,789	a	-9,997E-08	2·a	-1,999E-07
n	0,279	n-1	- 0,721	b	0,00027	b	0,00027
				c	- 0,00758		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	23/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1</sub>	Hora	11:51
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>2</sub>	Nº Prueba	18
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	22,5
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	25,0					
30,00	33,2	3,754	-	0,00028	1,44347	6,66943
60,00	41,0	3,763	0,009	0,00027	0,89386	6,45519
90,00	47,5	3,771	0,017	0,00026	0,67533	6,24094
120,00	52,3	3,779	0,025	0,00025	0,55351	6,02670
150,00	56,4	3,786	0,032	0,00024	0,47437	5,81245
180,00	58,9	3,793	0,039	0,00023	0,41819	5,59821
210,00	61,0	3,799	0,045	0,00022	0,37591	5,38397
240,00	63,8	3,806	0,052	0,00021	0,34276	5,16972
270,00	65,7	3,812	0,058	0,00020	0,31595	4,95548
300,00	67,9	3,818	0,064	0,00020	0,29375	4,74123
330,00	69,9	3,824	0,070	0,00019	0,27502	4,52699
360,00	72,3	3,829	0,075	0,00018	0,25896	4,31275
390,00	73,7	3,835	0,081	0,00017	0,24502	4,09850
420,00	75,3	3,840	0,086	0,00016	0,23278	3,88426

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
144,14	52,97	197,12	0,036	83,63	863,51	0,096843778
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	
			0,00025	0,580159171	5,99067	

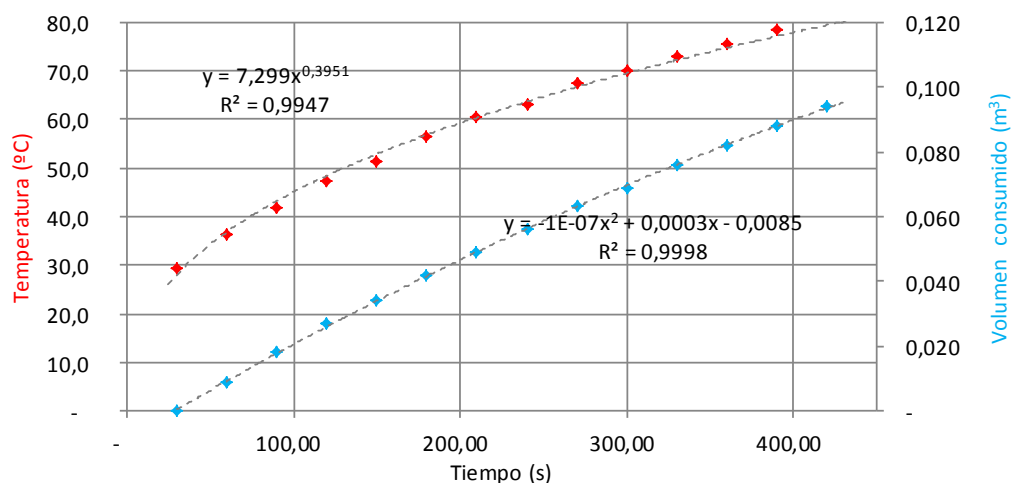


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	11,751	n·C	3,626	a	-1,473E-07	2·a	-2,946E-07
n	0,309	n-1	- 0,691	b	0,00028	b	0,00028
				c	- 0,00763		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	24/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quegador	QS <sub>1</sub>	Hora	9:35
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>3</sub>	Nº Prueba	19
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	19,3
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	22,3					
30,00	29,5	3,854	-	0,00030	1,54128	7,18828
60,00	36,2	3,863	0,009	0,00029	1,01345	6,97182
90,00	41,9	3,872	0,018	0,00028	0,79303	6,75535
120,00	47,3	3,881	0,027	0,00027	0,66638	6,53889
150,00	51,3	3,888	0,034	0,00026	0,58224	6,32242
180,00	56,3	3,896	0,042	0,00025	0,52145	6,10596
210,00	60,5	3,903	0,049	0,00024	0,47503	5,88949
240,00	62,9	3,910	0,056	0,00023	0,43817	5,67303
270,00	67,3	3,917	0,063	0,00023	0,40804	5,45657
300,00	70,1	3,923	0,069	0,00022	0,38285	5,24010
330,00	73,0	3,930	0,076	0,00021	0,36140	5,02364
360,00	75,5	3,936	0,082	0,00020	0,34287	4,80717
390,00	78,5	3,942	0,088	0,00019	0,32667	4,59071
420,00	80,1	3,948	0,094	0,00018	0,31235	4,37424

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
132,62	74,08	206,70	0,035	83,63	847,67	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,098654408
			0,00026	0,630576806	6,39178	

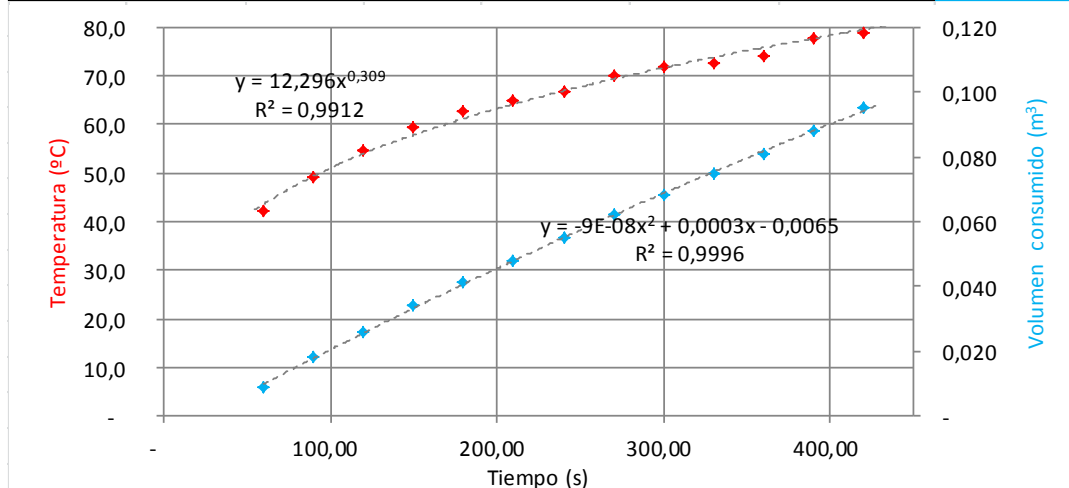


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	7,299	n·C	2,884	a	-1,488E-07	2·a	-2,976E-07
n	0,395	n-1	- 0,605	b	0,00031	b	0,00031
				c	- 0,00851		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	24/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1</sub>	Hora	9:51
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>3</sub>	Nº Prueba	20
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	19,7
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	23,1					
30,00	32,5	3,960	-	0,00028	1,54335	6,82573
60,00	42,3	3,969	0,009	0,00027	0,96812	6,66477
90,00	49,1	3,978	0,018	0,00027	0,73698	6,50381
120,00	54,5	3,986	0,026	0,00026	0,60729	6,34285
150,00	59,4	3,994	0,034	0,00025	0,52263	6,18189
180,00	62,7	4,001	0,041	0,00025	0,46230	6,02093
210,00	65,0	4,008	0,048	0,00024	0,41675	5,85997
240,00	66,8	4,015	0,055	0,00024	0,38094	5,69901
270,00	70,0	4,022	0,062	0,00023	0,35192	5,53804
300,00	71,9	4,028	0,068	0,00022	0,32784	5,37708
330,00	72,4	4,035	0,075	0,00022	0,30748	5,21612
360,00	73,9	4,041	0,081	0,00021	0,28999	5,05516
390,00	77,8	4,048	0,088	0,00020	0,27479	4,89420
420,00	78,8	4,055	0,095	0,00020	0,26142	4,73324

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
122,65	50,00	172,65	0,032	83,63	783,66	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,106711872
			0,00026	0,681822148	6,38937	

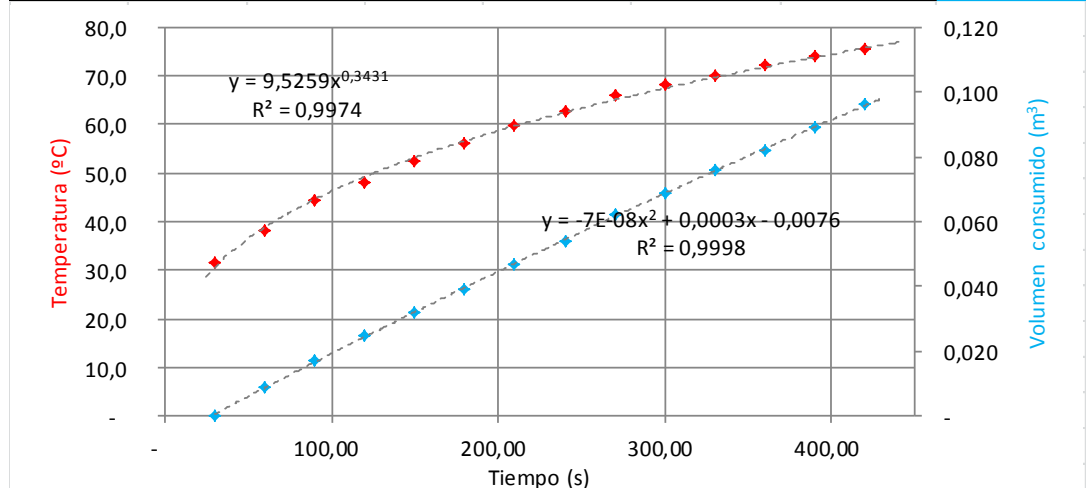


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	11,121	n·C	3,639	a	-1,107E-07	2·a	-2,213E-07
n	0,327	n-1	- 0,673	b	0,00029	b	0,00029
				c	- 0,00762		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	24/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1</sub>	Hora	10:15
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>3</sub>	Nº Prueba	21
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	20,1
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	23,1					
30,00	31,5	4,066	-	0,00027	1,46347	6,56564
60,00	38,1	4,075	0,009	0,00027	0,92821	6,46573
90,00	44,5	4,083	0,017	0,00026	0,71117	6,36583
120,00	48,1	4,091	0,025	0,00026	0,58872	6,26592
150,00	52,3	4,098	0,032	0,00025	0,50845	6,16601
180,00	56,2	4,105	0,039	0,00025	0,45106	6,06611
210,00	59,8	4,113	0,047	0,00025	0,40762	5,96620
240,00	62,8	4,120	0,054	0,00024	0,37339	5,86629
270,00	65,9	4,128	0,062	0,00024	0,34559	5,76639
300,00	68,1	4,135	0,069	0,00023	0,32248	5,66648
330,00	70,0	4,142	0,076	0,00023	0,30291	5,56657
360,00	72,2	4,148	0,082	0,00023	0,28609	5,46667
390,00	73,9	4,155	0,089	0,00022	0,27143	5,36676
420,00	75,4	4,162	0,096	0,00022	0,25854	5,26685

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
147,98	65,48	213,46	0,038	83,63	917,62	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,091133226
			0,00026	0,565124455	6,20108	

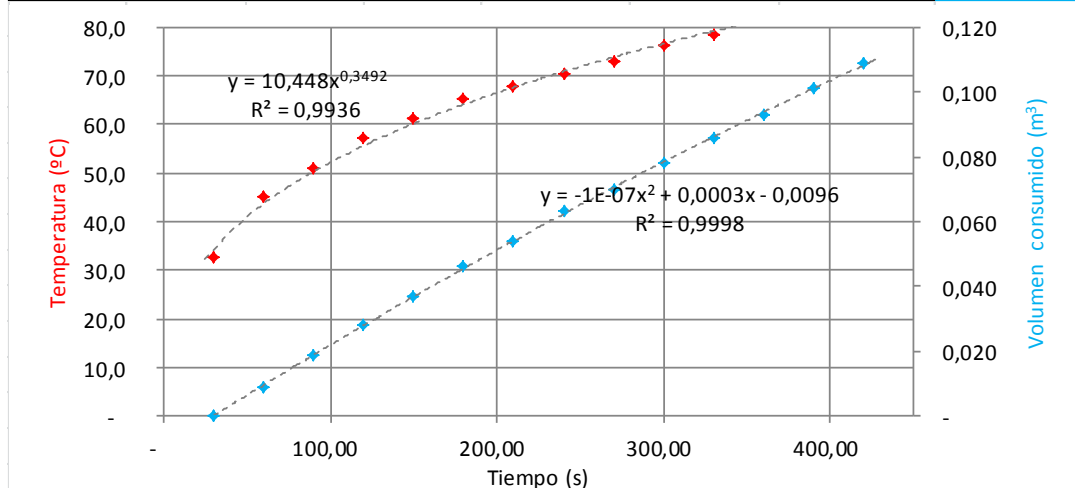


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	9,526	n·C	3,269	a	-6,868E-08	2·a	-1,374E-07
n	0,343	n-1	- 0,657	b	0,00027	b	0,00027
				c	- 0,00759		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	24/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1</sub>	Hora	10:50
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>4</sub>	Nº Prueba	22
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	21
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	25,0					
30,00	32,5	4,175	-	0,00032	1,66805	7,73632
60,00	45,0	4,184	0,009	0,00031	1,06245	7,58091
90,00	50,9	4,194	0,019	0,00031	0,81605	7,42550
120,00	57,3	4,203	0,028	0,00030	0,67672	7,27009
150,00	61,4	4,212	0,037	0,00029	0,58525	7,11468
180,00	65,2	4,221	0,046	0,00029	0,51977	6,95927
210,00	67,9	4,229	0,054	0,00028	0,47016	6,80386
240,00	70,3	4,238	0,063	0,00027	0,43103	6,64845
270,00	73,1	4,245	0,070	0,00027	0,39923	6,49304
300,00	76,3	4,253	0,078	0,00026	0,37277	6,33763
330,00	78,3	4,261	0,086	0,00026	0,35035	6,18222
360,00	81,2	4,268	0,093	0,00025	0,33106	6,02681
390,00	82,7	4,276	0,101	0,00024	0,31426	5,87140
420,00	85,3	4,284	0,109	0,00024	0,29946	5,71599

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)		V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
102,44	46,71	149,15		0,031	83,63	756,49	
Valores medios →				V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,110544655
				0,00030	0,816307072	7,38441	



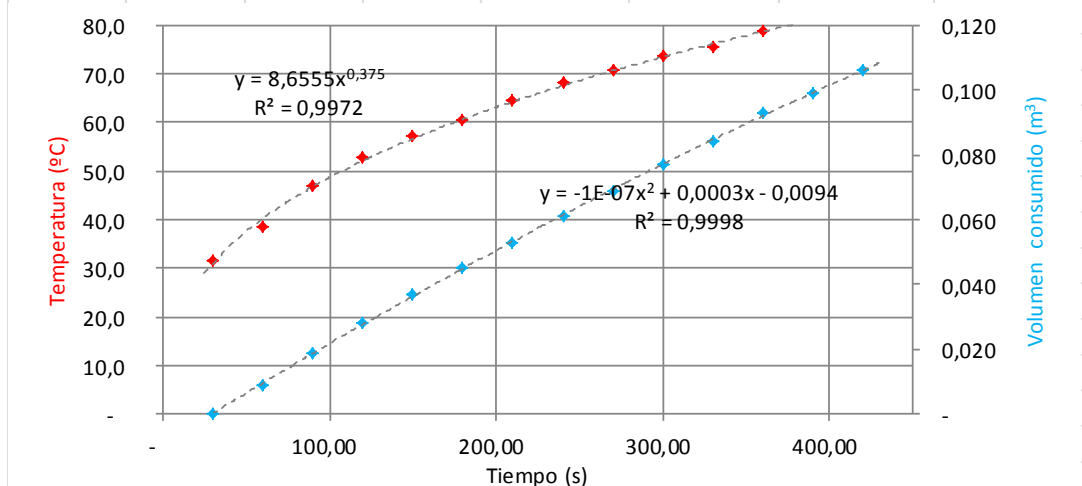
T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	10,448	n·C	3,649	a	-1,068E-07	2·a	-2,137E-07
n	0,349	n-1	- 0,651	b	0,00033	b	0,00033
				c	- 0,00963		



Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	24/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quegador	QS <sub>1</sub>	Hora	11:32
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>4</sub>	Nº Prueba	23
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	22,3
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	24,3					
30,00	31,7	4,296	-	0,00031	1,61921	7,63575
60,00	38,4	4,305	0,009	0,00031	1,04989	7,47368
90,00	46,8	4,315	0,019	0,00030	0,81485	7,31161
120,00	52,7	4,324	0,028	0,00029	0,68075	7,14954
150,00	57,1	4,333	0,037	0,00029	0,59212	6,98747
180,00	60,4	4,341	0,045	0,00028	0,52835	6,82540
210,00	64,4	4,349	0,053	0,00027	0,47982	6,66333
240,00	68,3	4,357	0,061	0,00027	0,44139	6,50126
270,00	70,9	4,365	0,069	0,00026	0,41007	6,33918
300,00	73,7	4,373	0,077	0,00025	0,38393	6,17711
330,00	75,5	4,380	0,084	0,00025	0,36173	6,01504
360,00	78,8	4,389	0,093	0,00024	0,34258	5,85297
390,00	81,1	4,395	0,099	0,00023	0,32586	5,69090
420,00	82,8	4,402	0,106	0,00023	0,31111	5,52883

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
115,53	59,29	174,82	0,034	83,63	827,85	0,10101625
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	
			0,00030	0,723828378	7,16546	

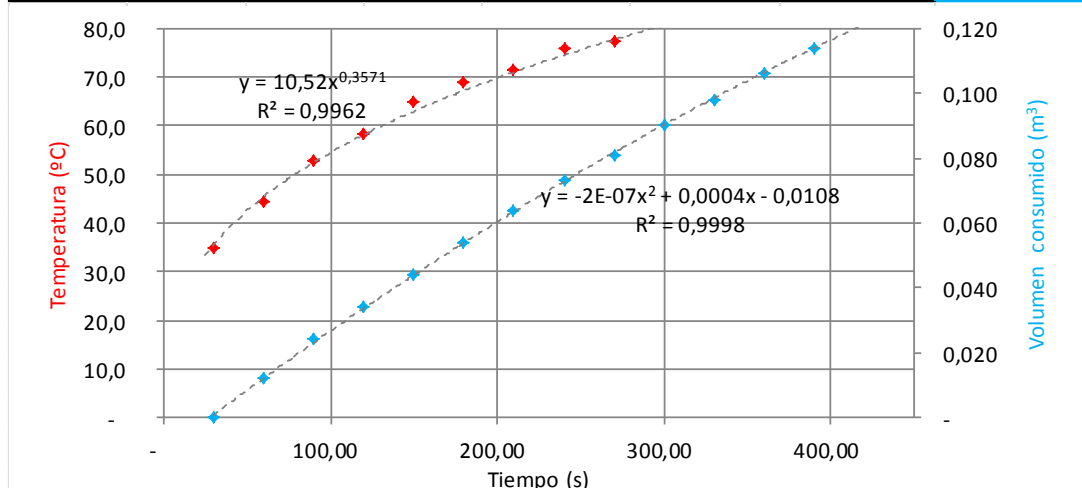


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	8,656	n·C	3,245	a	-1,114E-07	2·a	-2,228E-07
n	0,375	n-1	- 0,625	b	0,00032	b	0,00032
				c	- 0,00938		

Experimento I							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	24/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1</sub>	Hora	11:32
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>4</sub>	Nº Prueba	24
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	22,3
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	24,3					
30,00	34,9	4,419	-	0,00038	1,76396	9,26678
60,00	44,5	4,431	0,012	0,00037	1,12969	8,99259
90,00	52,9	4,443	0,024	0,00036	0,87046	8,71840
120,00	58,4	4,453	0,034	0,00035	0,72348	8,44422
150,00	64,8	4,463	0,044	0,00034	0,62680	8,17003
180,00	69,0	4,473	0,054	0,00033	0,55747	7,89584
210,00	71,6	4,483	0,064	0,00031	0,50487	7,62165
240,00	75,8	4,492	0,073	0,00030	0,46334	7,34746
270,00	77,3	4,500	0,081	0,00029	0,42955	7,07328
300,00	81,4	4,509	0,090	0,00028	0,40142	6,79909
330,00	82,5	4,517	0,098	0,00027	0,37756	6,52490
360,00	84,0	4,525	0,106	0,00026	0,35702	6,25071
390,00	87,4	4,533	0,114	0,00025	0,33911	5,97652
420,00	89,7	4,541	0,122	0,00024	0,32333	5,70234

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)		V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
88,94	42,10	131,04		0,032	83,63	778,19	
Valores medios →				V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,107461507
				0,00036	0,940260038	8,74974	



T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	10,520	n·C	3,757	a	-1,885E-07	2·a	-3,770E-07
n	0,357	n-1	- 0,643	b	0,00039	b	0,00039
				c	- 0,01082		

## C.2. Experimento II. Aire primario

Experimento II							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	25/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Queimador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	9:18
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	1
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	19,9
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					
t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)	
-	22,5						
30,00	28,3	4,614	-	0,00017	1,22494	4,22960	
60,00	33,5	4,620	0,006	0,00017	0,76281	4,09861	
90,00	38,8	4,625	0,011	0,00016	0,57822	3,96762	
120,00	43,3	4,630	0,016	0,00016	0,47503	3,83664	
150,00	46,7	4,634	0,020	0,00015	0,40785	3,70565	
180,00	49,8	4,639	0,025	0,00015	0,36007	3,57466	
210,00	51,5	4,643	0,029	0,00014	0,32408	3,44367	
240,00	53,5	4,647	0,033	0,00014	0,29581	3,31268	
270,00	55,4	4,651	0,037	0,00013	0,27294	3,18169	
300,00	57,1	4,655	0,041	0,00013	0,25398	3,05070	
330,00	59,6	4,659	0,045	0,00012	0,23797	2,91971	
360,00	60,7	4,662	0,048	0,00012	0,22423	2,78873	
390,00	62,5	4,666	0,052	0,00011	0,21230	2,65774	
420,00	64,2	4,669	0,055	0,00010	0,20181	2,52675	
Δt <sub>T1-T2</sub> (s)	t <sub>T1</sub> (s)	t <sub>T2</sub> (s)		V <sub>T1-T2</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,T1-T2</sub> (KJ)	Q <sub>o,T1-T2</sub> (KJ)	η
155,78	204,93	360,71		0,020	41,81	486,91	
Valores medios →				V' <sub>T1-T2</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,T1-T2</sub> (KW)	Q' <sub>o,T1-T2</sub> (KW)	0,085874406
				0,000129	0,268418625	3,12571	

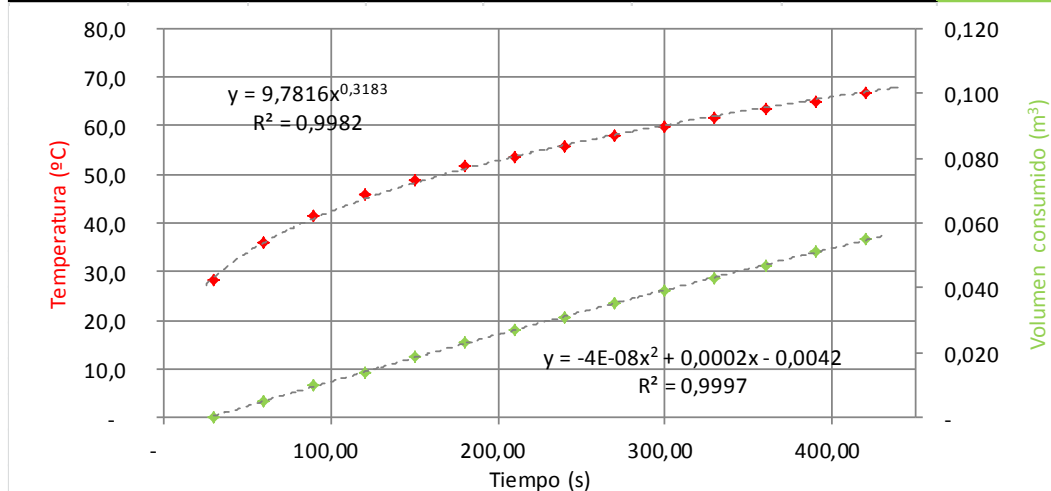
  
  

T	T=C·t <sup>n</sup>	T'	T'=n·C·t <sup>n-1</sup>	V	V=a·t²+b·t+c	V'	V'=2a·t+b
C	9,452	n·C	2,993	a	-9,005E-08	2·a	-1,801E-07
n	0,317	n-1	- 0,683	b	0,00018	b	0,00018
				c	- 0,00474		

Experimento II						
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora
$m_{\text{ag}}$	1	Kg		M. control	$m_1$	Nº Prueba
$C_{p,\text{ag}}$	4,1813	KJ/Kg°C		$a_t$ (mm)	13	$T_{\text{ext}}$ (°C)
$\Delta t$	0,01	s		A.P.	100%	
$\Delta T$	0,1	°C				
$\Delta V$	0,001	m <sup>3</sup>				

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	$V_{\text{estd}}$ (m <sup>3</sup> )	$V'$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q'_i$ (KW)	$Q'_0$ (KW)
-	22,8					
30,00	28,3	4,678	-	0,00015	1,28154	3,75171
60,00	35,9	4,683	0,005	0,00015	0,79897	3,69288
90,00	41,6	4,688	0,010	0,00015	0,60604	3,63405
120,00	45,7	4,692	0,014	0,00015	0,49812	3,57521
150,00	48,8	4,697	0,019	0,00015	0,42783	3,51638
180,00	51,7	4,701	0,023	0,00014	0,37783	3,45755
210,00	53,7	4,705	0,027	0,00014	0,34015	3,39871
240,00	55,9	4,709	0,031	0,00014	0,31055	3,33988
270,00	57,9	4,713	0,035	0,00014	0,28659	3,28104
300,00	59,6	4,717	0,039	0,00013	0,26673	3,22221
330,00	61,6	4,721	0,043	0,00013	0,24995	3,16338
360,00	63,4	4,725	0,047	0,00013	0,23556	3,10454
390,00	65,0	4,729	0,051	0,00013	0,22305	3,04571
420,00	66,7	4,733	0,055	0,00012	0,21206	2,98687

$\Delta t_{T_1-T_2}$ (s)	$t_{T_1}$ (s)	$t_{T_2}$ (s)		$V_{T_1-T_2}$ (m <sup>3</sup> )	$Q_{i,T_1-T_2}$ (KJ)	$Q_{0,T_1-T_2}$ (KJ)	$\eta$
167,91	253,82	421,73		0,022	41,81	528,61	
Valores medios →				$V'_{T_1-T_2}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q'_{i,T_1-T_2}$ (KW)	$Q'_{0,T_1-T_2}$ (KW)	0,07909917
				0,000130	0,249014682	3,14813	

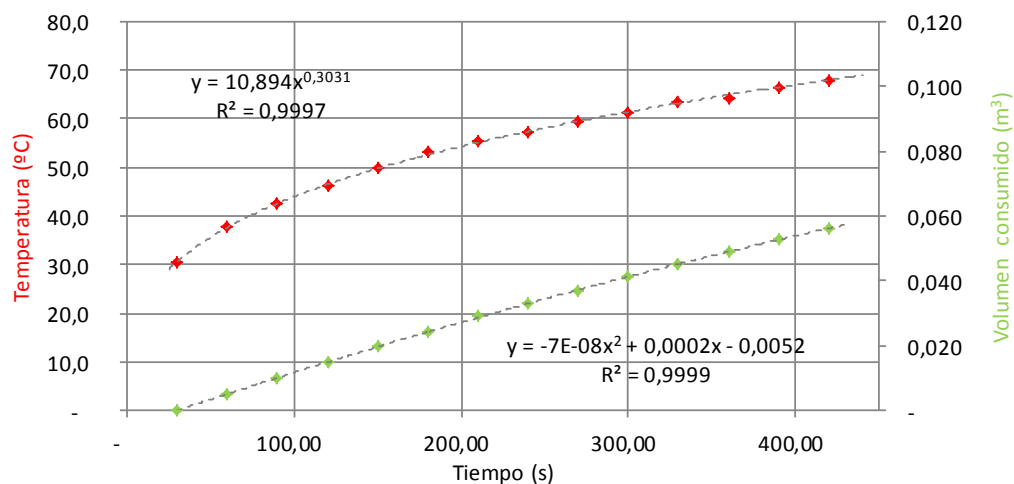


T	$T=C \cdot t^n$	$T'$	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	$V'$	$V'=2a \cdot t+b$
C	9,782	$n \cdot C$	3,114	a	-4,045E-08	2·a	-8,089E-08
n	0,318	$n-1$	- 0,682	b	0,00016	b	0,00016
				c	- 0,00423		

Experimento II							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	25/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Queimador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	9:47
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	3
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	21,3
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>i</sub> (KW)	Q <sub>o</sub> (KW)
-	24,3					
30,00	30,5	4,740	-	0,00017	1,29012	4,18276
60,00	37,7	4,745	0,005	0,00017	0,79586	4,07619
90,00	42,6	4,750	0,010	0,00016	0,59995	3,96962
120,00	46,2	4,755	0,015	0,00016	0,49096	3,86305
150,00	49,8	4,760	0,020	0,00015	0,42025	3,75649
180,00	53,0	4,764	0,024	0,00015	0,37011	3,64992
210,00	55,3	4,769	0,029	0,00015	0,33241	3,54335
240,00	57,3	4,773	0,033	0,00014	0,30287	3,43679
270,00	59,5	4,777	0,037	0,00014	0,27900	3,33022
300,00	61,4	4,781	0,041	0,00013	0,25925	3,22365
330,00	63,4	4,785	0,045	0,00013	0,24259	3,11709
360,00	64,3	4,789	0,049	0,00012	0,22831	3,01052
390,00	66,5	4,793	0,053	0,00012	0,21593	2,90395
420,00	67,8	4,796	0,056	0,00012	0,20506	2,79738

Δt <sub>T1-T2</sub> (s)	t <sub>T1</sub> (s)	t <sub>T2</sub> (s)	V <sub>T1-T2</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,T1-T2</sub> (KJ)	Q <sub>o,T1-T2</sub> (KJ)	η
165,65	235,10	400,75	0,022	41,81	523,45	
Valores medios →			V' <sub>T1-T2</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,T1-T2</sub> (KW)	Q' <sub>o,T1-T2</sub> (KW)	0,079880299
			0,000130	0,252418906	3,15996	

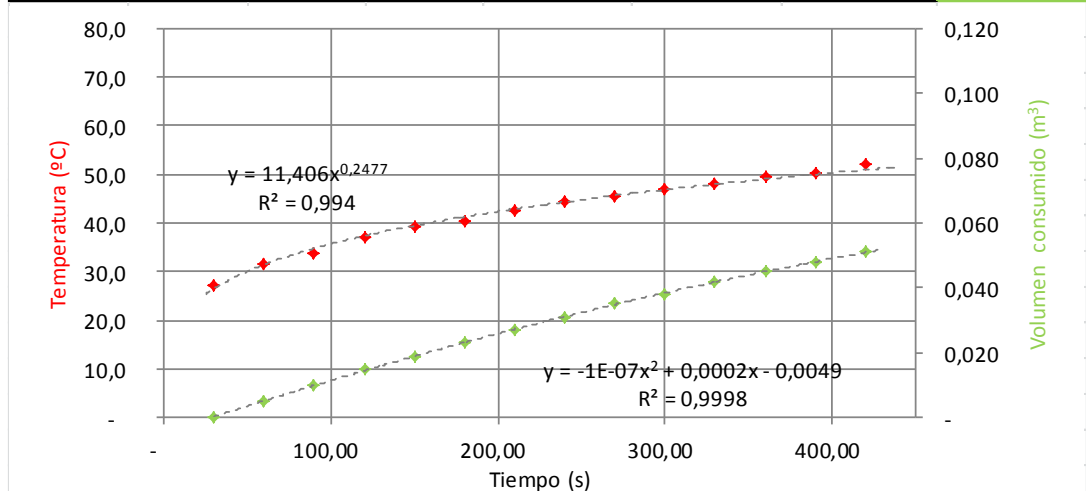


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2 + b \cdot t + c$	V'	$V'=2a \cdot t + b$
C	10,894	n · C	3,302	a	-7,326E-08	2 · a	-1,465E-07
n	0,303	n-1	- 0,697	b	0,00018	b	0,00018
				c	- 0,00524		

Experimento II						
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)
Δt	0,01	s		A.P.	50%	
ΔT	0,1	°C				
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>				

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>i</sub> (KW)	Q <sub>0</sub> (KW)
-	24,3					
30,00	27,3	5,738	-	0,00017	0,91421	4,05454
60,00	31,4	5,743	0,005	0,00016	0,54271	3,91578
90,00	33,9	5,748	0,010	0,00016	0,40003	3,77702
120,00	37,1	5,753	0,015	0,00015	0,32218	3,63827
150,00	39,2	5,757	0,019	0,00014	0,27239	3,49951
180,00	40,4	5,761	0,023	0,00014	0,23747	3,36075
210,00	42,4	5,765	0,027	0,00013	0,21147	3,22199
240,00	44,3	5,769	0,031	0,00013	0,19126	3,08323
270,00	45,4	5,773	0,035	0,00012	0,17504	2,94447
300,00	47,1	5,776	0,038	0,00012	0,16170	2,80571
330,00	48,1	5,780	0,042	0,00011	0,15051	2,66695
360,00	49,5	5,783	0,045	0,00010	0,14098	2,52819
390,00	50,4	5,786	0,048	0,00010	0,13274	2,38943
420,00	52,0	5,789	0,051	0,00009	0,12554	2,25067

Δt <sub>T1-T2</sub> (s)	t <sub>T1</sub> (s)	t <sub>T2</sub> (s)	V <sub>T1-T2</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,T1-T2</sub> (KJ)	Q <sub>0,T1-T2</sub> (KJ)	η
202,15	128,89	331,04	0,026	41,81	632,64	
Valores medios →			V' <sub>T1-T2</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,T1-T2</sub> (KW)	Q' <sub>0,T1-T2</sub> (KW)	0,066092586
			0,000129	0,206846351	3,12965	

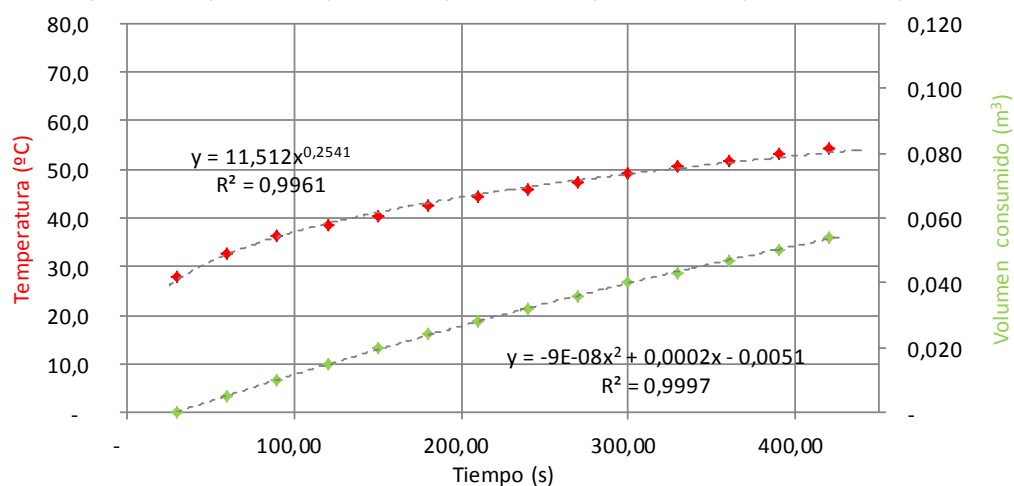


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	11,406	n · C	2,825	a	-9,539E-08	2 · a	-1,908E-07
n	0,248	n-1	- 0,752	b	0,00017	b	0,00017
				c	- 0,00491		

Experimento II							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	28/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	10:54
$m_{\text{ag}}$	1	Kg		M. control	$m_1$	Nº Prueba	5
$C_{p,\text{ag}}$	4,1813	KJ/Kg°C		$a_t$ (mm)	13	$T_{\text{ext}}$ (°C)	22,5
$\Delta t$	0,01	s		A.P.	50%		
$\Delta T$	0,1	°C					
$\Delta V$	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>i</sub> (KW)	Q <sub>o</sub> (KW)
-	24,6					
30,00	27,7	5,797	-	0,00017	0,96734	4,14401
60,00	32,8	5,802	0,005	0,00017	0,57681	4,01636
90,00	36,3	5,807	0,010	0,00016	0,42626	3,88870
120,00	38,4	5,812	0,015	0,00016	0,34394	3,76104
150,00	40,3	5,817	0,020	0,00015	0,29120	3,63338
180,00	42,7	5,821	0,024	0,00014	0,25418	3,50572
210,00	44,2	5,825	0,028	0,00014	0,22657	3,37806
240,00	45,8	5,829	0,032	0,00013	0,20509	3,25041
270,00	47,2	5,833	0,036	0,00013	0,18784	3,12275
300,00	49,2	5,837	0,040	0,00012	0,17364	2,99509
330,00	50,6	5,840	0,043	0,00012	0,16172	2,86743
360,00	51,7	5,844	0,047	0,00011	0,15156	2,73977
390,00	53,3	5,847	0,050	0,00011	0,14278	2,61211
420,00	54,3	5,851	0,054	0,00010	0,13510	2,48445

$\Delta t_{T_1-T_2}$ (s)	$t_{T_1}$ (s)	$t_{T_2}$ (s)		$V_{T_1-T_2}$ (m <sup>3</sup> )	$Q_{i,T_1-T_2}$ (KJ)	$Q_{o,T_1-T_2}$ (KJ)	$\eta$
214,91	163,09	378,00		0,028	41,81	670,61	
Valores medios →				$V'_{T_1-T_2}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q'_{i,T_1-T_2}$ (KW)	$Q'_{o,T_1-T_2}$ (KW)	0,062350245
				0,000129	0,194560432	3,12044	

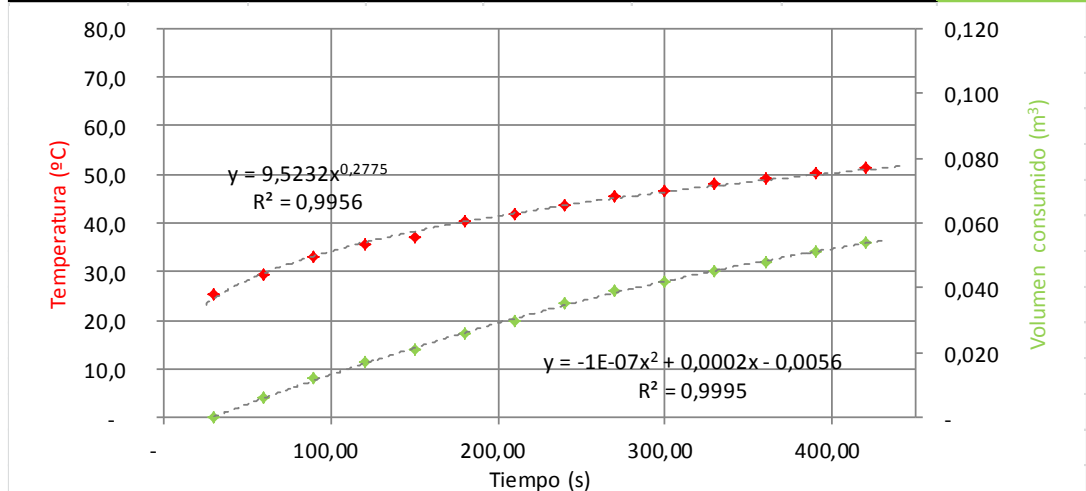


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	11,512	$n \cdot C$	2,925	a	-8,776E-08	2·a	-1,755E-07
n	0,254	n-1	- 0,746	b	0,00018	b	0,00018
				c	- 0,00506		

Experimento II							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	28/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	12:53
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	6
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	23,5
Δt	0,01	s		A.P.	50%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>i</sub> (KW)	Q <sub>o</sub> (KW)
-	22,4					
30,00	25,2	5,999	-	0,00019	0,94685	4,70682
60,00	29,4	6,005	0,006	0,00019	0,57385	4,49258
90,00	32,9	6,011	0,012	0,00018	0,42814	4,27833
120,00	35,4	6,016	0,017	0,00017	0,34779	4,06409
150,00	37,0	6,020	0,021	0,00016	0,29601	3,84985
180,00	40,3	6,025	0,026	0,00015	0,25948	3,63560
210,00	41,9	6,029	0,030	0,00014	0,23213	3,42136
240,00	43,8	6,034	0,035	0,00013	0,21079	3,20711
270,00	45,3	6,038	0,039	0,00012	0,19359	2,99287
300,00	46,6	6,041	0,042	0,00011	0,17940	2,77862
330,00	47,9	6,044	0,045	0,00011	0,16747	2,56438
360,00	49,2	6,047	0,048	0,00010	0,15726	2,35014
390,00	50,1	6,050	0,051	0,00009	0,14843	2,13589
420,00	51,2	6,053	0,054	0,00008	0,14069	1,92165

Δt <sub>T1-T2</sub> (s)	t <sub>T1</sub> (s)	t <sub>T2</sub> (s)	V <sub>T1-T2</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,T1-T2</sub> (KJ)	Q <sub>o,T1-T2</sub> (KJ)	η
193,23	146,35	339,59	0,025	41,81	615,62	0,067919626
Valores medios →			V' <sub>T1-T2</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,T1-T2</sub> (KW)	Q' <sub>o,T1-T2</sub> (KW)	
			0,000131	0,216385707	3,18591	



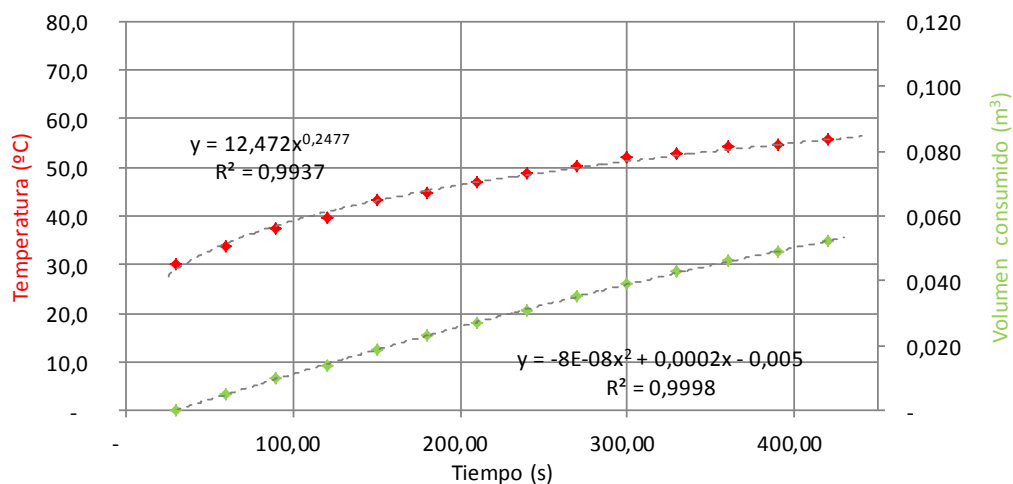
T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	9,523	n · C	2,643	a	-1,473E-07	2 · a	-2,946E-07
n	0,278	n-1	- 0,722	b	0,00020	b	0,00020
				c	- 0,00563		



Experimento II							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	29/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	10:14
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	7
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	22,1
Δt	0,01	s		A.P.	0%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>i</sub> (KW)	Q <sub>o</sub> (KW)
-	24,8					
30,00	29,9	6,148	-	0,00017	0,99953	4,02424
60,00	33,9	6,153	0,005	0,00016	0,59336	3,90435
90,00	37,5	6,158	0,010	0,00016	0,43736	3,78446
120,00	39,5	6,162	0,014	0,00015	0,35224	3,66457
150,00	43,1	6,167	0,019	0,00015	0,29781	3,54469
180,00	44,6	6,171	0,023	0,00014	0,25964	3,42480
210,00	47,1	6,175	0,027	0,00014	0,23120	3,30491
240,00	48,6	6,179	0,031	0,00013	0,20911	3,18502
270,00	50,3	6,183	0,035	0,00013	0,19137	3,06513
300,00	51,9	6,187	0,039	0,00012	0,17679	2,94525
330,00	52,8	6,191	0,043	0,00012	0,16456	2,82536
360,00	54,1	6,194	0,046	0,00011	0,15413	2,70547
390,00	54,5	6,197	0,049	0,00011	0,14512	2,58558
420,00	55,6	6,200	0,052	0,00010	0,13725	2,46569

Δt <sub>T1-T2</sub> (s)	t <sub>T1</sub> (s)	t <sub>T2</sub> (s)	V <sub>T1-T2</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,T1-T2</sub> (KJ)	Q <sub>o,T1-T2</sub> (KJ)	η
196,39	148,08	344,46	0,026	41,81	620,58	
Valores medios →			V' <sub>T1-T2</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,T1-T2</sub> (KW)	Q' <sub>o,T1-T2</sub> (KW)	0,067377144
			0,000130	0,212909446	3,15997	

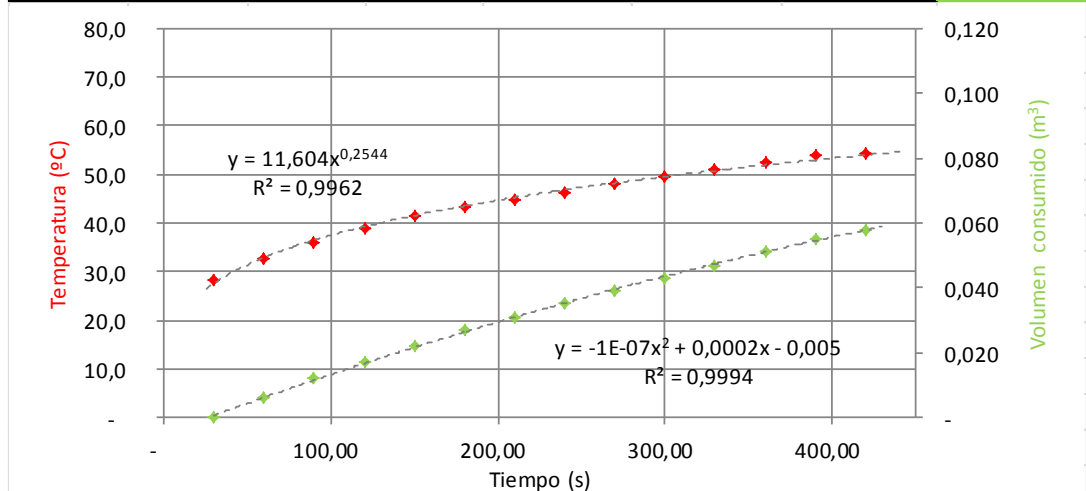


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	12,472	n · C	3,089	a	-8,242E-08	2 · a	-1,648E-07
n	0,248	n-1	- 0,752	b	0,00017	b	0,00017
				c	- 0,00501		

Experimento II							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	29/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	11:14
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	8
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	23
Δt	0,01	s		A.P.	0%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>i</sub> (KW)	Q <sub>o</sub> (KW)
-	23,8					
30,00	28,3	6,209	-	0,00019	0,97764	4,53176
60,00	32,7	6,215	0,006	0,00018	0,58309	4,38079
90,00	35,9	6,221	0,012	0,00017	0,43097	4,22982
120,00	38,7	6,226	0,017	0,00017	0,34778	4,07885
150,00	41,3	6,231	0,022	0,00016	0,29447	3,92788
180,00	43,4	6,236	0,027	0,00016	0,25705	3,77691
210,00	44,9	6,240	0,031	0,00015	0,22914	3,62594
240,00	46,2	6,244	0,035	0,00014	0,20742	3,47497
270,00	48,1	6,248	0,039	0,00014	0,18999	3,32400
300,00	49,5	6,252	0,043	0,00013	0,17563	3,17303
330,00	50,8	6,256	0,047	0,00012	0,16359	3,02206
360,00	52,6	6,260	0,051	0,00012	0,15331	2,87109
390,00	53,8	6,264	0,055	0,00011	0,14443	2,72012
420,00	54,4	6,267	0,058	0,00011	0,13667	2,56915

Δt <sub>T1-T2</sub> (s)	t <sub>T1</sub> (s)	t <sub>T2</sub> (s)	V <sub>T1-T2</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,T1-T2</sub> (KJ)	Q <sub>o,T1-T2</sub> (KJ)	η
232,97	188,41	421,39	0,030	41,81	733,49	
Valores medios →			V' <sub>T1-T2</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,T1-T2</sub> (KW)	Q' <sub>o,T1-T2</sub> (KW)	0,057005464
			0,000130	0,179474397	3,14837	

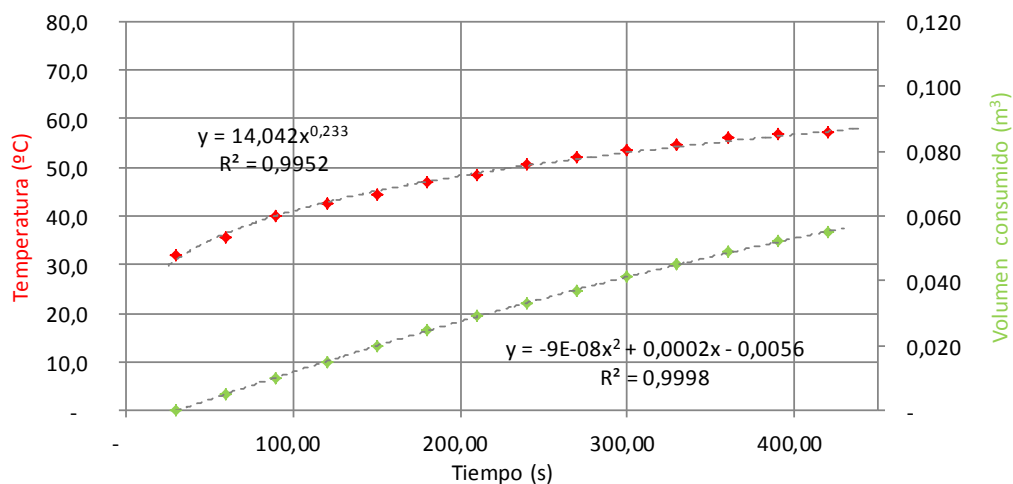


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	11,604	n · C	2,952	a	-1,038E-07	2 · a	-2,076E-07
n	0,254	n-1	- 0,746	b	0,00019	b	0,00019
				c	- 0,00504		

Experimento II							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Metal	Fecha	29/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Queimador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	11:35
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	9
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	23
Δt	0,01	s		A.P.	0%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>i</sub> (KW)	Q <sub>o</sub> (KW)
-	26,4					
30,00	31,9	6,275	-	0,00018	1,00708	4,32962
60,00	35,6	6,280	0,005	0,00017	0,59179	4,19308
90,00	40,0	6,285	0,010	0,00017	0,43361	4,05654
120,00	42,5	6,290	0,015	0,00016	0,34775	3,92000
150,00	44,5	6,295	0,020	0,00016	0,29305	3,78346
180,00	46,8	6,300	0,025	0,00015	0,25480	3,64692
210,00	48,4	6,304	0,029	0,00014	0,22639	3,51038
240,00	50,5	6,308	0,033	0,00014	0,20435	3,37385
270,00	51,9	6,312	0,037	0,00013	0,18670	3,23731
300,00	53,4	6,316	0,041	0,00013	0,17220	3,10077
330,00	54,5	6,320	0,045	0,00012	0,16006	2,96423
360,00	56,0	6,324	0,049	0,00012	0,14973	2,82769
390,00	56,8	6,327	0,052	0,00011	0,14081	2,69115
420,00	57,1	6,330	0,055	0,00011	0,13303	2,55461

Δt <sub>T1-T2</sub> (s)	t <sub>T1</sub> (s)	t <sub>T2</sub> (s)	V <sub>T1-T2</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,T1-T2</sub> (KJ)	Q <sub>o,T1-T2</sub> (KJ)	η
230,25	178,66	408,91	0,030	41,81	720,45	
Valores medios →			V' <sub>T1-T2</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,T1-T2</sub> (KW)	Q' <sub>o,T1-T2</sub> (KW)	0,058037084
			0,000129	0,181600565	3,12904	



T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	14,042	n·C	3,271	a	-9,386E-08	2·a	-1,877E-07
n	0,233	n-1	- 0,767	b	0,00018	b	0,00018
				c	- 0,00561		

## C.3. Experimento III. Caracterización de la carcasa de ladrillo

Experimento III							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Ladrillo	Fecha	31/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	9:34
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	1
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	17,5
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					
t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)	
-	23,9						
30,00	27,7	6,835	-	0,00017	1,07373	4,02535	
60,00	33,5	6,840	0,005	0,00016	0,65288	3,89436	
90,00	37,3	6,845	0,010	0,00016	0,48803	3,76337	
120,00	39,8	6,849	0,014	0,00015	0,39698	3,63238	
150,00	42,1	6,853	0,018	0,00014	0,33823	3,50139	
180,00	44,9	6,858	0,023	0,00014	0,29675	3,37040	
210,00	46,6	6,862	0,027	0,00013	0,26567	3,23942	
240,00	48,7	6,866	0,031	0,00013	0,24139	3,10843	
270,00	50,3	6,870	0,035	0,00012	0,22182	2,97744	
300,00	52,3	6,873	0,038	0,00012	0,20566	2,84645	
330,00	53,4	6,877	0,042	0,00011	0,19207	2,71546	
360,00	56,3	6,880	0,045	0,00011	0,18044	2,58447	
390,00	57,1	6,883	0,048	0,00010	0,17036	2,45348	
420,00	58,4	6,886	0,051	0,00010	0,16154	2,32250	
Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)		V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
372,57	116,22	488,79		0,044	83,63	1.056,43	
Valores medios →				V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,079158716
				0,00012	0,224	2,8355	

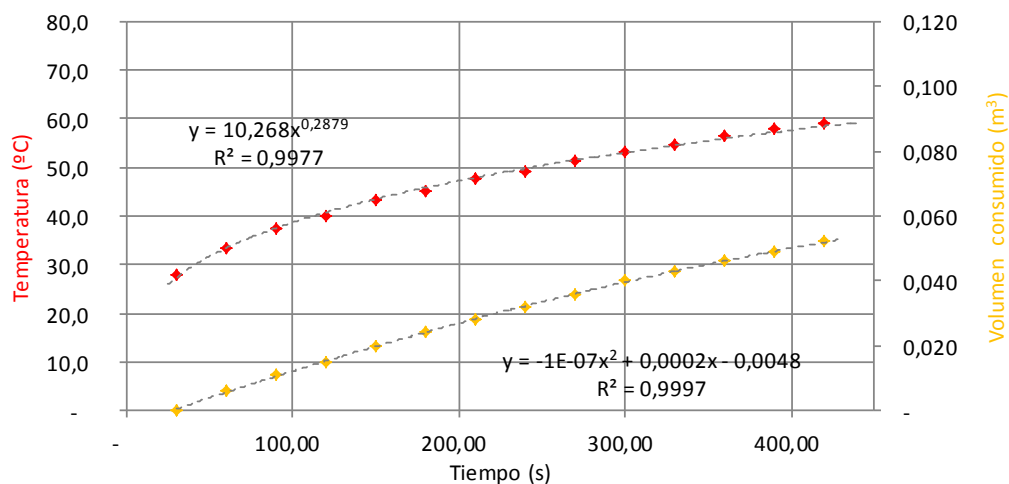
  

T	T=C·t <sup>n</sup>	T'	T'=n·C·t <sup>n-1</sup>	V	V=a·t²+b·t+c	V'	V'=2a·t+b
C	10,450	n·C	2,950	a	-9,005E-08	2·a	-1,801E-07
n	0,282	n-1	- 0,718	b	0,00017	b	0,00017
				c	- 0,00505		

Experimento III							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Ladrillo	Fecha	31/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	9:52
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	2
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	17,9
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	22,7					
30,00	27,8	6,897	-	0,00017	1,09723	4,21439
60,00	33,5	6,903	0,006	0,00017	0,66980	4,05787
90,00	37,5	6,908	0,011	0,00016	0,50183	3,90135
120,00	40,1	6,912	0,015	0,00015	0,40888	3,74483
150,00	43,1	6,917	0,020	0,00015	0,34881	3,58831
180,00	45,1	6,921	0,024	0,00014	0,30634	3,43179
210,00	47,5	6,925	0,028	0,00014	0,27450	3,27527
240,00	49,3	6,929	0,032	0,00013	0,24960	3,11875
270,00	51,3	6,933	0,036	0,00012	0,22952	2,96223
300,00	53,1	6,937	0,040	0,00012	0,21293	2,80571
330,00	54,7	6,940	0,043	0,00011	0,19896	2,64919
360,00	56,4	6,943	0,046	0,00010	0,18701	2,49267
390,00	58,1	6,946	0,049	0,00010	0,17665	2,33615
420,00	59,2	6,949	0,052	0,00009	0,16757	2,17963

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
347,36	112,47	459,83	0,041	83,63	999,69	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,083651947
			0,00012	0,240746322	2,87795	

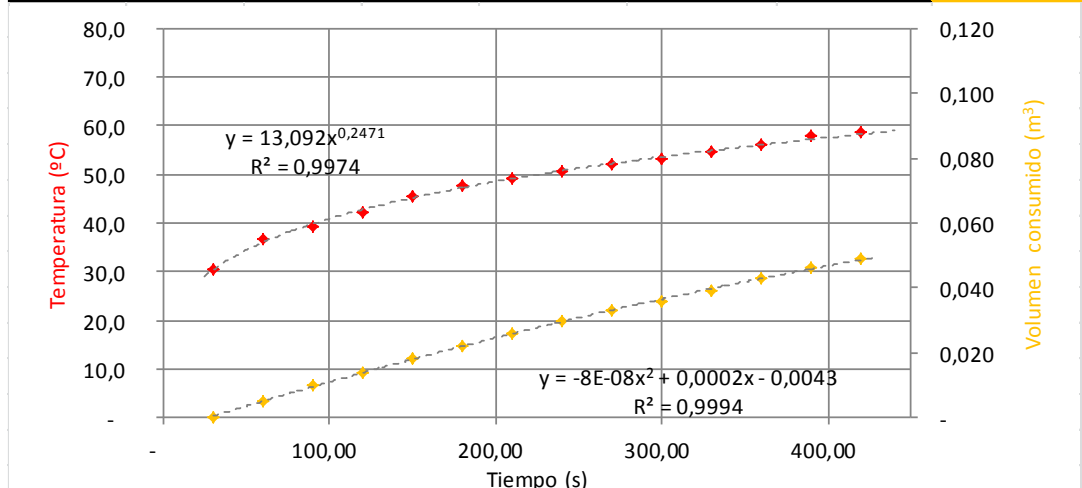


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	10,268	n·C	2,957	a	-1,076E-07	2·a	-2,152E-07
n	0,288	n-1	- 0,712	b	0,00018	b	0,00018
				c	- 0,00483		

Experimento III						
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Ladrillo	Fecha
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quegador	QS <sub>1/2</sub>	Hora
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)
Δt	0,01	s		A.P.	100%	
ΔT	0,1	°C				
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>				

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	23,8					
30,00	30,3	6,957	-	0,00016	1,04494	3,78280
60,00	36,7	6,962	0,005	0,00015	0,62008	3,66180
90,00	39,2	6,967	0,010	0,00015	0,45695	3,54080
120,00	42,2	6,971	0,014	0,00014	0,36796	3,41980
150,00	45,3	6,975	0,018	0,00014	0,31106	3,29880
180,00	47,7	6,979	0,022	0,00013	0,27116	3,17781
210,00	49,3	6,983	0,026	0,00013	0,24145	3,05681
240,00	50,5	6,987	0,030	0,00012	0,21835	2,93581
270,00	51,9	6,990	0,033	0,00012	0,19982	2,81481
300,00	53,0	6,993	0,036	0,00011	0,18459	2,69381
330,00	54,6	6,996	0,039	0,00011	0,17180	2,57282
360,00	56,2	7,000	0,043	0,00010	0,16091	2,45182
390,00	57,8	7,003	0,046	0,00010	0,15150	2,33082
420,00	58,6	7,006	0,049	0,00009	0,14328	2,20982

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
381,92	91,82	473,73	0,044	83,63	1.055,34	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,07924069
			0,00011	0,218964867	2,76329	

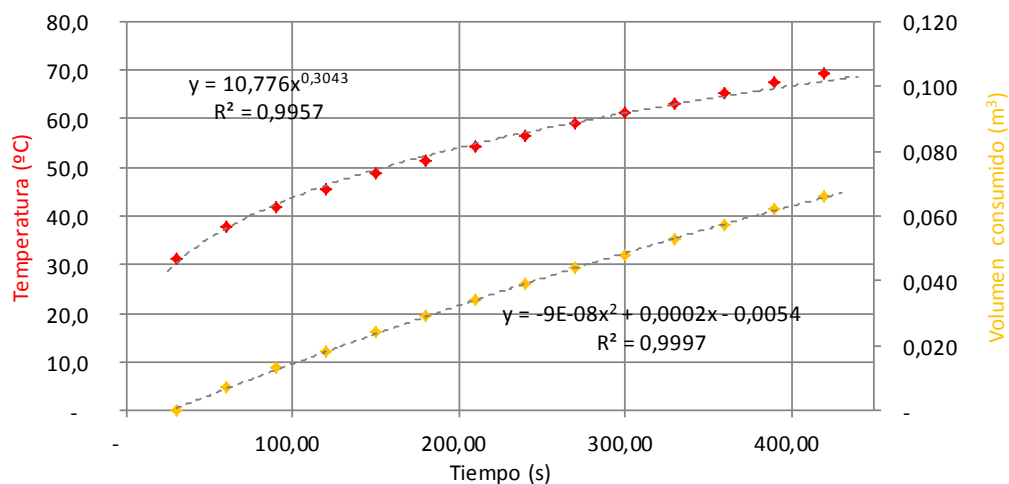


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2 + b \cdot t + c$	V'	$V'=2a \cdot t + b$
C	13,092	n · C	3,235	a	-8,318E-08	2 · a	-1,664E-07
n	0,247	n-1	- 0,753	b	0,00016	b	0,00016
				c	- 0,00430		

Experimento III							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Ladrillo	Fecha	31/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	10:33
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>2</sub>	Nº Prueba	4
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	18,4
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	23,9					
30,00	31,1	7,033	-	0,00020	1,28692	4,87589
60,00	37,9	7,040	0,007	0,00020	0,79458	4,74712
90,00	41,9	7,046	0,013	0,00019	0,59929	4,61835
120,00	45,3	7,051	0,018	0,00019	0,49060	4,48958
150,00	48,7	7,057	0,024	0,00018	0,42006	4,36081
180,00	51,3	7,062	0,029	0,00017	0,37002	4,23204
210,00	54,1	7,067	0,034	0,00017	0,33240	4,10327
240,00	56,6	7,072	0,039	0,00016	0,30291	3,97451
270,00	59,2	7,077	0,044	0,00016	0,27908	3,84574
300,00	61,3	7,081	0,048	0,00015	0,25936	3,71697
330,00	63,2	7,086	0,053	0,00015	0,24272	3,58820
360,00	65,4	7,090	0,057	0,00014	0,22846	3,45943
390,00	67,4	7,095	0,062	0,00014	0,21609	3,33066
420,00	69,1	7,099	0,066	0,00013	0,20523	3,20190

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
207,57	74,41	281,98	0,036	83,63	880,05	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,095024185
			0,00017	0,402883308	4,23980	

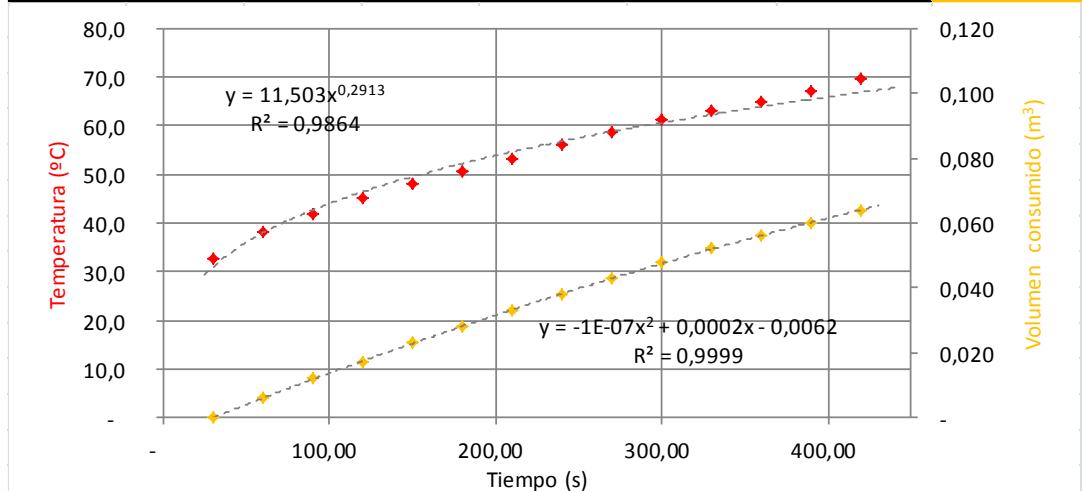


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	10,776	n·C	3,279	a	-8,852E-08	2·a	-1,770E-07
n	0,304	n-1	- 0,696	b	0,00021	b	0,00021
				c	- 0,00538		

Experimento III						
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Ladrillo	Fecha
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>2</sub>	Nº Prueba
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)
Δt	0,01	s		A.P.	100%	
ΔT	0,1	°C				
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>				

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	24,6					
30,00	32,5	7,108	-	0,00020	1,25814	4,90564
60,00	38,3	7,114	0,006	0,00020	0,76984	4,76355
90,00	41,7	7,120	0,012	0,00019	0,57758	4,62146
120,00	45,2	7,125	0,017	0,00018	0,47105	4,47937
150,00	47,9	7,131	0,023	0,00018	0,40216	4,33728
180,00	50,7	7,136	0,028	0,00017	0,35341	4,19519
210,00	53,1	7,141	0,033	0,00017	0,31684	4,05310
240,00	56,1	7,146	0,038	0,00016	0,28823	3,91101
270,00	58,5	7,151	0,043	0,00016	0,26515	3,76892
300,00	61,4	7,156	0,048	0,00015	0,24607	3,62683
330,00	62,9	7,160	0,052	0,00014	0,23000	3,48474
360,00	64,8	7,164	0,056	0,00014	0,21625	3,34265
390,00	67,0	7,168	0,060	0,00013	0,20432	3,20056
420,00	69,5	7,172	0,064	0,00013	0,19387	3,05847

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)		V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
217,82	72,08	289,91		0,038	83,63	912,79	
Valores medios →				V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,091615975
				0,00017	0,383914521	4,19048	



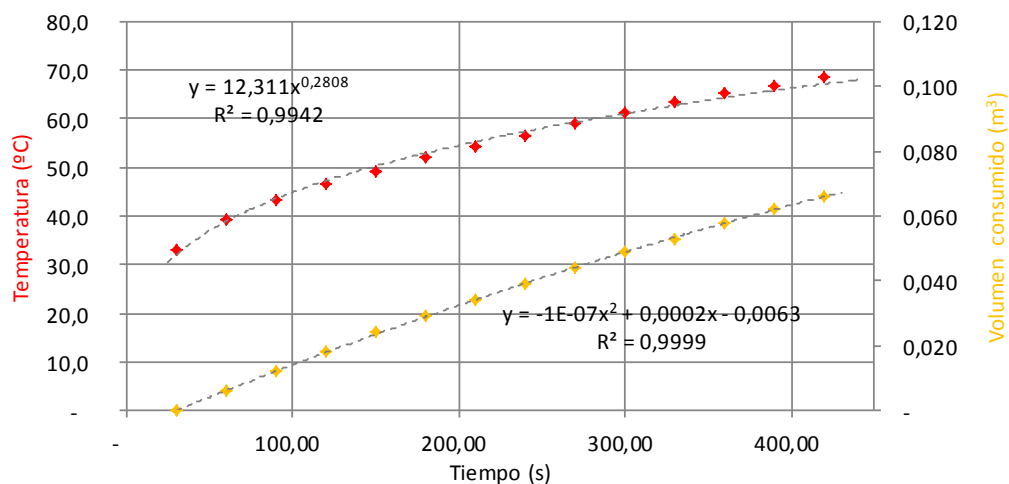
T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	11,503	n·C	3,351	a	-9,768E-08	2·a	-1,954E-07
n	0,291	n-1	- 0,709	b	0,00021	b	0,00021
				c	- 0,00619		



Experimento III							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Ladrillo	Fecha	31/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quegador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	11:28
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>2</sub>	Nº Prueba	6
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	21,1
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	23,5					
30,00	32,9	7,181	-	0,00021	1,25229	5,02286
60,00	39,1	7,187	0,006	0,00020	0,76069	4,88077
90,00	43,1	7,193	0,012	0,00020	0,56828	4,73868
120,00	46,7	7,199	0,018	0,00019	0,46207	4,59659
150,00	49,2	7,205	0,024	0,00018	0,39356	4,45450
180,00	51,9	7,210	0,029	0,00018	0,34520	4,31241
210,00	54,3	7,215	0,034	0,00017	0,30898	4,17032
240,00	56,6	7,220	0,039	0,00017	0,28068	4,02823
270,00	58,9	7,225	0,044	0,00016	0,25789	3,88614
300,00	61,2	7,230	0,049	0,00015	0,23907	3,74406
330,00	63,4	7,234	0,053	0,00015	0,22323	3,60197
360,00	65,3	7,239	0,058	0,00014	0,20969	3,45988
390,00	66,8	7,243	0,062	0,00014	0,19796	3,31779
420,00	68,7	7,247	0,066	0,00013	0,18768	3,17570

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
215,07	66,44	281,51	0,039	83,63	933,62	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,089571377
			0,00018	0,388823586	4,34094	

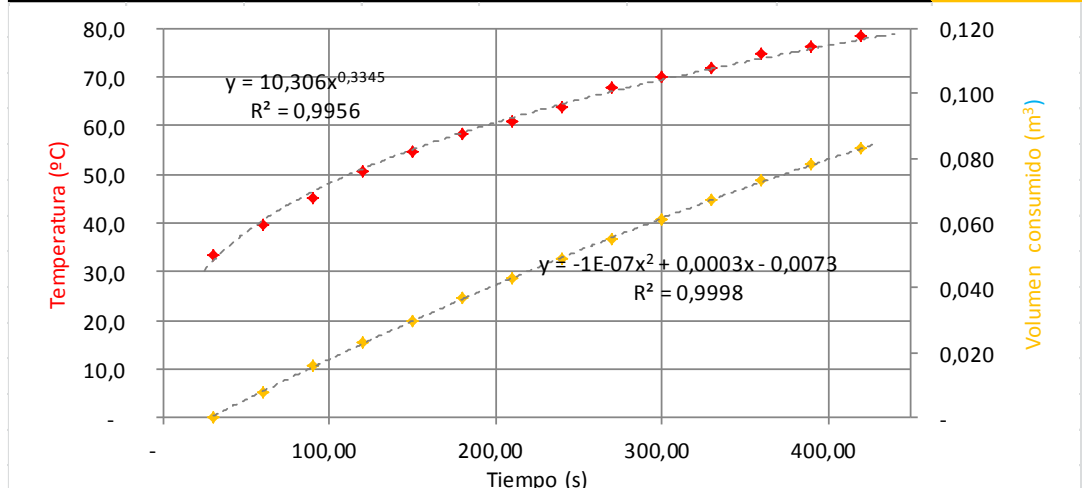


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	12,311	n·C	3,457	a	-9,768E-08	2·a	-1,954E-07
n	0,281	n-1	- 0,719	b	0,00021	b	0,00021
				c	- 0,00627		

Experimento III						
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Ladrillo	Fecha
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quegador	QS <sub>1/2</sub>	Hora
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>3</sub>	Nº Prueba
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)
Δt	0,01	s		A.P.	100%	
ΔT	0,1	°C				
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>				

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	24,7					
30,00	33,5	7,260	-	0,00026	1,49843	6,24971
60,00	39,7	7,268	0,008	0,00025	0,94469	6,07654
90,00	45,2	7,276	0,016	0,00024	0,72126	5,90337
120,00	50,5	7,283	0,023	0,00024	0,59558	5,73020
150,00	54,8	7,290	0,030	0,00023	0,51338	5,55703
180,00	58,2	7,297	0,037	0,00022	0,45472	5,38386
210,00	60,8	7,303	0,043	0,00021	0,41038	5,21068
240,00	63,9	7,309	0,049	0,00021	0,37548	5,03751
270,00	67,9	7,315	0,055	0,00020	0,34717	4,86434
300,00	70,0	7,321	0,061	0,00019	0,32366	4,69117
330,00	71,8	7,327	0,067	0,00019	0,30377	4,51800
360,00	74,7	7,333	0,073	0,00018	0,28668	4,34483
390,00	76,1	7,338	0,078	0,00017	0,27181	4,17166
420,00	78,6	7,343	0,083	0,00016	0,25872	3,99848

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
136,20	57,68	193,88	0,032	83,63	775,89	0,10778114
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	
			0,00023	0,61401287	5,69685	

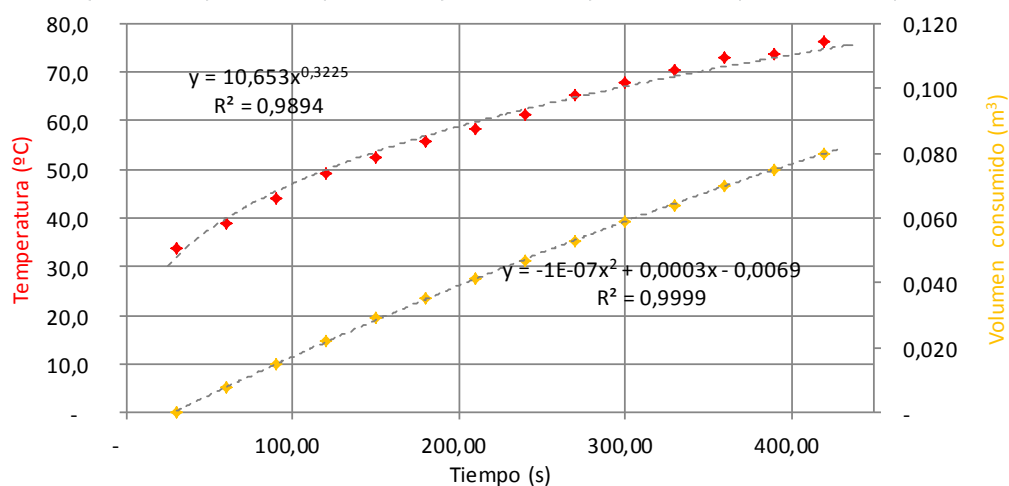


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	10,306	n·C	3,447	a	-1,190E-07	2·a	-2,381E-07
n	0,334	n-1	- 0,666	b	0,00026	b	0,00026
				c	- 0,00734		

Experimento III							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Ladrillo	Fecha	31/01/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	12:17
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>3</sub>	Nº Prueba	8
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	21,1
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	24,3					
30,00	33,9	7,354	-	0,00025	1,43379	5,94788
60,00	38,9	7,362	0,008	0,00024	0,89646	5,79136
90,00	44,1	7,369	0,015	0,00023	0,68113	5,63484
120,00	49,3	7,376	0,022	0,00023	0,56050	5,47832
150,00	52,6	7,383	0,029	0,00022	0,48186	5,32180
180,00	55,6	7,389	0,035	0,00021	0,42587	5,16528
210,00	58,4	7,395	0,041	0,00021	0,38363	5,00876
240,00	61,2	7,401	0,047	0,00020	0,35045	4,85224
270,00	65,2	7,407	0,053	0,00019	0,32357	4,69572
300,00	67,8	7,413	0,059	0,00019	0,30128	4,53920
330,00	70,2	7,418	0,064	0,00018	0,28244	4,38268
360,00	72,8	7,424	0,070	0,00017	0,26627	4,22616
390,00	73,8	7,429	0,075	0,00017	0,25221	4,06964
420,00	76,3	7,434	0,080	0,00016	0,23986	3,91312

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
152,25	60,51	212,76	0,034	83,63	820,86	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,101876223
			0,00022	0,549268164	5,39152	

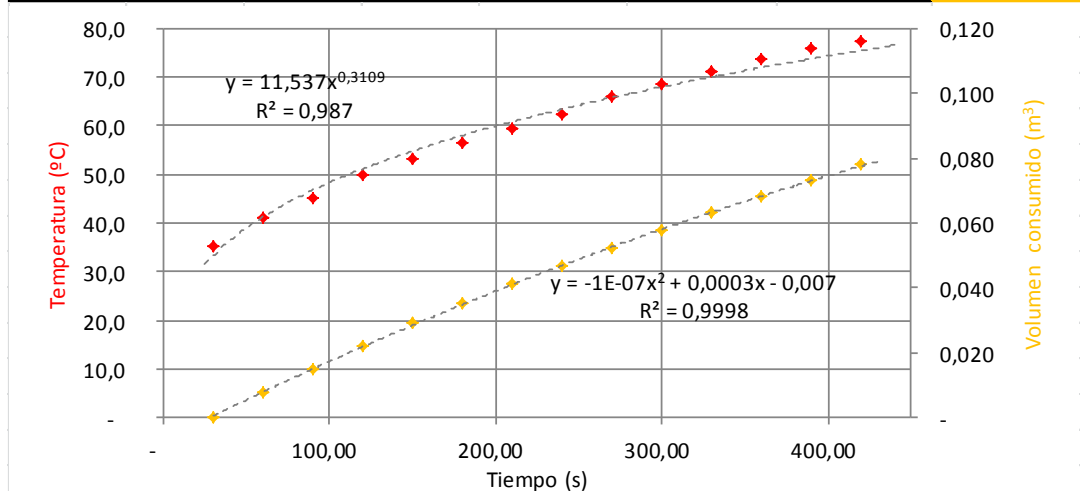


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	10,653	n·C	3,435	a	-1,076E-07	2·a	-2,152E-07
n	0,322	n-1	- 0,678	b	0,00025	b	0,00025
				c	- 0,00692		

Experimento III						
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Ladrillo	Fecha
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>3</sub>	Nº Prueba
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)
Δt	0,01	s		A.P.	100%	
ΔT	0,1	°C				
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>				

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	28,4					
30,00	35,2	7,447	-	0,00025	1,43933	6,02048
60,00	41,2	7,455	0,008	0,00024	0,89274	5,83066
90,00	45,1	7,462	0,015	0,00023	0,67512	5,64084
120,00	49,9	7,469	0,022	0,00022	0,55371	5,45101
150,00	53,2	7,476	0,029	0,00022	0,47479	5,26119
180,00	56,3	7,482	0,035	0,00021	0,41874	5,07137
210,00	59,5	7,488	0,041	0,00020	0,37654	4,88155
240,00	62,3	7,494	0,047	0,00019	0,34344	4,69172
270,00	65,9	7,499	0,052	0,00019	0,31666	4,50190
300,00	68,5	7,505	0,058	0,00018	0,29449	4,31208
330,00	71,0	7,510	0,063	0,00017	0,27577	4,12226
360,00	73,5	7,515	0,068	0,00016	0,25972	3,93243
390,00	75,8	7,520	0,073	0,00015	0,24578	3,74261
420,00	77,5	7,525	0,078	0,00015	0,23355	3,55279

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
146,42	54,54	200,97	0,033	83,63	790,97	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,105726128
			0,00022	0,571127107	5,40195	

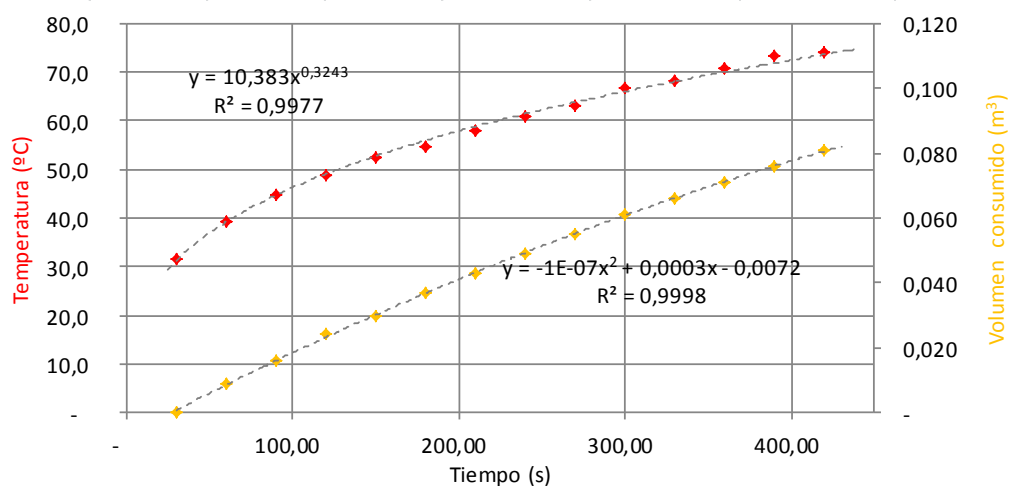


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	11,537	n·C	3,587	a	-1,305E-07	2·a	-2,610E-07
n	0,311	n-1	- 0,689	b	0,00026	b	0,00026
				c	- 0,00705		

Experimento III							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Ladrillo	Fecha	01/02/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	10:20
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>4</sub>	Nº Prueba	10
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	17,3
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	20,0					
30,00	31,7	7,537	-	0,00026	1,41381	6,35506
60,00	39,2	7,546	0,009	0,00025	0,88506	6,14081
90,00	44,9	7,553	0,016	0,00024	0,67295	5,92657
120,00	48,9	7,561	0,024	0,00024	0,55406	5,71233
150,00	52,3	7,567	0,030	0,00023	0,47651	5,49808
180,00	54,8	7,574	0,037	0,00022	0,42128	5,28384
210,00	57,9	7,580	0,043	0,00021	0,37960	5,06959
240,00	60,7	7,586	0,049	0,00020	0,34685	4,85535
270,00	63,0	7,592	0,055	0,00019	0,32031	4,64111
300,00	66,6	7,598	0,061	0,00018	0,29830	4,42686
330,00	68,3	7,603	0,066	0,00017	0,27970	4,21262
360,00	70,7	7,608	0,071	0,00016	0,26373	3,99837
390,00	73,4	7,613	0,076	0,00016	0,24984	3,78413
420,00	74,2	7,618	0,081	0,00015	0,23764	3,56988

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
159,54	64,03	223,56	0,036	83,63	884,22	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,094575534
			0,00023	0,52417487	5,54239	

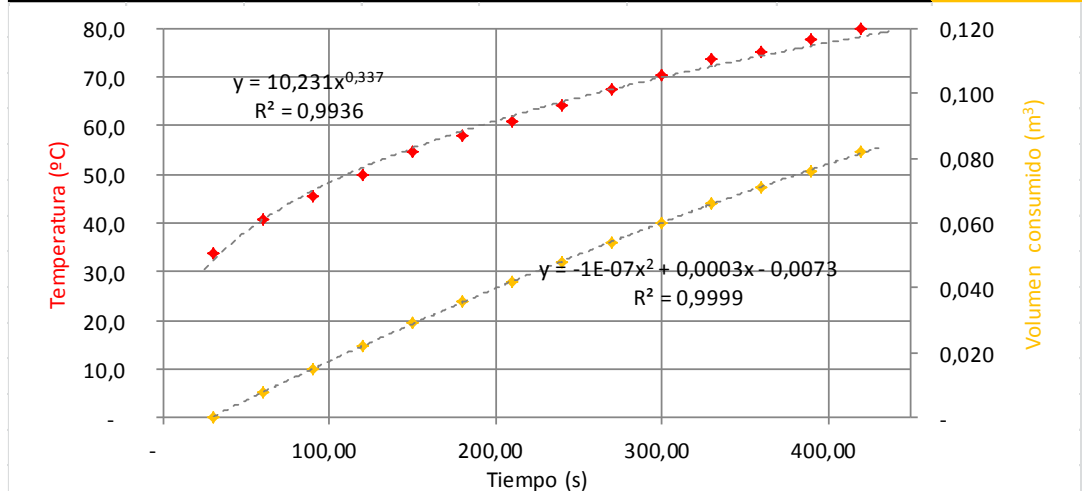


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	10,383	n·C	3,367	a	-1,473E-07	2·a	-2,946E-07
n	0,324	n-1	- 0,676	b	0,00027	b	0,00027
				c	- 0,00721		

Experimento III						
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Ladrillo	Fecha
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quegador	QS <sub>1/2</sub>	Hora
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>4</sub>	Nº Prueba
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)
Δt	0,01	s		A.P.	100%	
ΔT	0,1	°C				
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>				

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	21,1					
30,00	33,6	7,629	-	0,00025	1,51185	6,09219
60,00	40,7	7,637	0,008	0,00024	0,95482	5,93123
90,00	45,6	7,644	0,015	0,00024	0,72975	5,77027
120,00	49,8	7,651	0,022	0,00023	0,60303	5,60931
150,00	54,5	7,658	0,029	0,00022	0,52010	5,44835
180,00	57,8	7,665	0,036	0,00022	0,46088	5,28739
210,00	60,7	7,671	0,042	0,00021	0,41610	5,12643
240,00	64,2	7,677	0,048	0,00020	0,38085	4,96547
270,00	67,4	7,683	0,054	0,00020	0,35224	4,80451
300,00	70,5	7,689	0,060	0,00019	0,32847	4,64355
330,00	73,5	7,695	0,066	0,00018	0,30836	4,48259
360,00	75,3	7,700	0,071	0,00018	0,29107	4,32163
390,00	77,7	7,705	0,076	0,00017	0,27603	4,16067
420,00	80,0	7,711	0,082	0,00016	0,26279	3,99970

Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
133,24	57,17	190,40	0,031	83,63	744,66	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,112301423
			0,00023	0,627654279	5,58901	

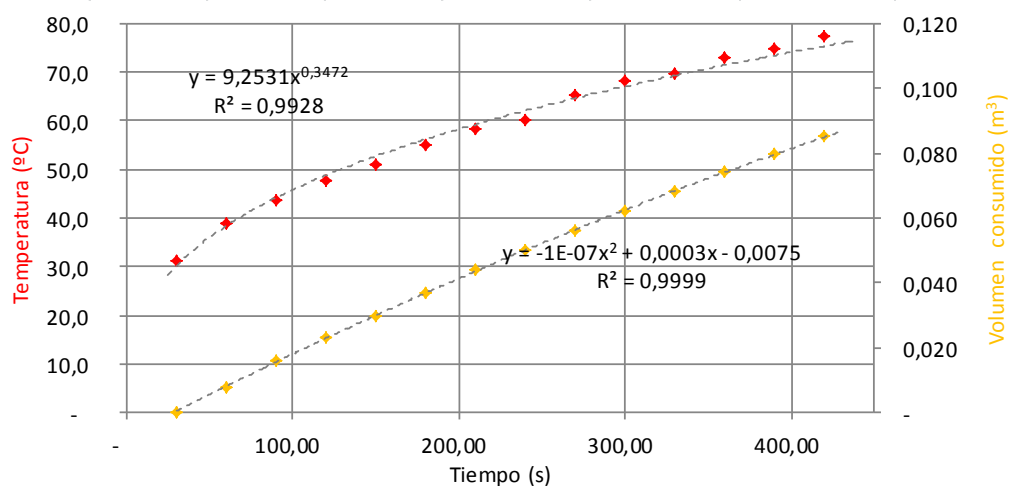


T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	10,231	n·C	3,448	a	-1,107E-07	2·a	-2,213E-07
n	0,337	n-1	- 0,663	b	0,00026	b	0,00026
				c	- 0,00731		

Experimento III							
$\rho_{\text{bio}}$	0,8816	Kg/m <sup>3</sup>		Carcasa	Ladrillo	Fecha	01/02/2013
LHV <sub>bio</sub>	27500	KJ/Kg		Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	11:24
m <sub>ag</sub>	1	Kg		M. control	m <sub>4</sub>	Nº Prueba	12
C <sub>p,ag</sub>	4,1813	KJ/Kg°C		a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	17
Δt	0,01	s		A.P.	100%		
ΔT	0,1	°C					
ΔV	0,001	m <sup>3</sup>					

t(s)	T(°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i</sub> (KW)	Q' <sub>o</sub> (KW)
-	22,7					
30,00	31,3	7,722	-	0,00026	1,45837	6,29101
60,00	38,7	7,730	0,008	0,00025	0,92758	6,13116
90,00	43,6	7,738	0,016	0,00025	0,71186	5,97131
120,00	47,6	7,745	0,023	0,00024	0,58997	5,81146
150,00	50,8	7,752	0,030	0,00023	0,51000	5,65160
180,00	54,9	7,759	0,037	0,00023	0,45277	5,49175
210,00	58,3	7,766	0,044	0,00022	0,40942	5,33190
240,00	60,3	7,772	0,050	0,00021	0,37524	5,17205
270,00	65,2	7,778	0,056	0,00021	0,34747	5,01220
300,00	68,0	7,784	0,062	0,00020	0,32438	4,85235
330,00	69,7	7,790	0,068	0,00019	0,30481	4,69250
360,00	72,9	7,796	0,074	0,00019	0,28798	4,53265
390,00	74,7	7,802	0,080	0,00018	0,27332	4,37280
420,00	77,3	7,807	0,085	0,00017	0,26041	4,21295

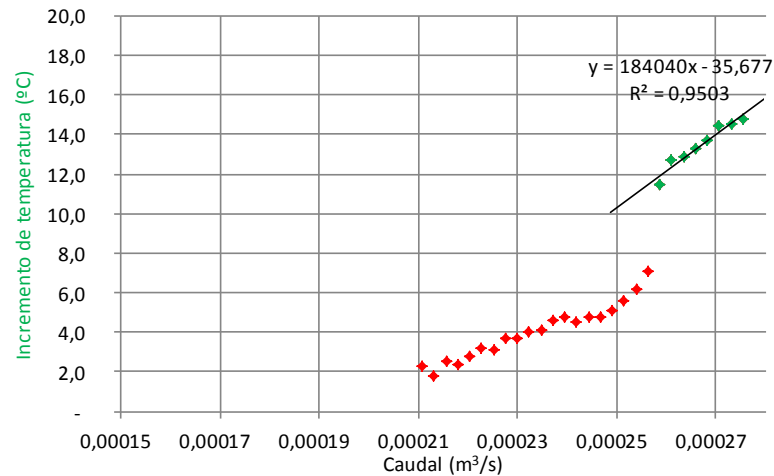
Δt <sub>40-60</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)	t <sub>60</sub> (s)	V <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>i,40-60</sub> (KJ)	Q <sub>o,40-60</sub> (KJ)	η
150,19	67,80	217,99	0,035	83,63	854,49	
Valores medios →			V' <sub>40-60</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>i,40-60</sub> (KW)	Q' <sub>o,40-60</sub> (KW)	0,097866874
			0,00023	0,556810496	5,68947	



T	$T=C \cdot t^n$	T'	$T'=n \cdot C \cdot t^{n-1}$	V	$V=a \cdot t^2+b \cdot t+c$	V'	$V'=2a \cdot t+b$
C	9,253	n·C	3,213	a	-1,099E-07	2·a	-2,198E-07
n	0,347	n-1	- 0,653	b	0,00027	b	0,00027
				c	- 0,00748		

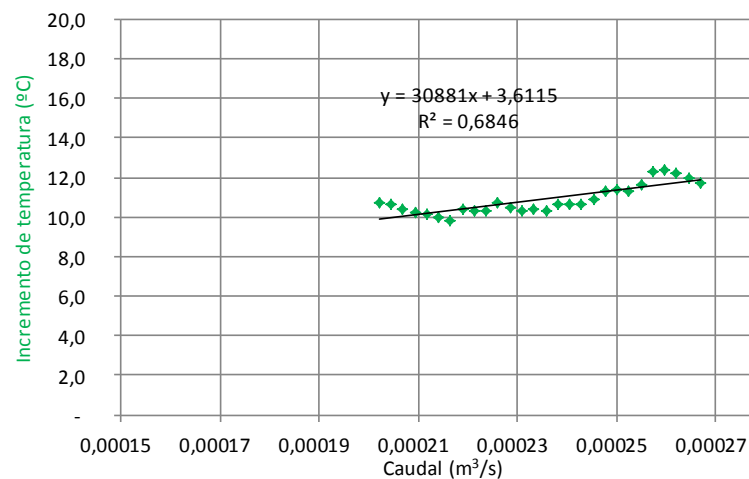
## C.4. Experimento IV. Serpentin helicoidal

t(s)	T(°C)	T <sub>estd</sub> (°C)	V(m³)	V <sub>estd</sub> (m³)	V'(m³/s)	Experimento						V
-	27,5							Carcasa	Metal	Fecha	05/02/2013	
10,00	40,0	12,5	9,999	-	0,00028			Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	11:43	
20,00	46,1	18,6	10,003	0,004	0,00028			M. control	m <sub>4</sub>	Nº Prueba	1	
30,00	42,3	14,8	10,007	0,008	0,00028			a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	25,4	
40,00	42,0	14,5	10,009	0,010	0,00027			A.P.	100%			
50,00	41,9	14,4	10,012	0,013	0,00027			V'agua (l/min)	1	→	Inicial	
60,00	41,2	13,7	10,015	0,016	0,00027			Δt (s)	0,01	t1	29,67	
70,00	40,8	13,3	10,018	0,019	0,00027			ΔT (°C)	0,1	t2	28,66	
80,00	40,4	12,9	10,021	0,022	0,00026			ΔV (m³)	0,001	t3	34,70	
90,00	40,2	12,7	10,024	0,025	0,00026						1,0	
100,00	39,0	11,5	10,027	0,028	0,00026							
110,00	34,6	7,1	10,029	0,030	0,00026			V=a·t²+b·t+c	V'=b·t+c	T=b·V'+c		Medio
120,00	33,7	6,2	10,032	0,033	0,00025	a		-1,1967E-07				V No
130,00	33,1	5,6	10,035	0,036	0,00025	b		0,000282628	-2,393E-07	2,11E+05		-
140,00	32,6	5,1	10,037	0,038	0,00025	c		0,086365209	0,000283	- 44,58393		
150,00	32,3	4,8	10,040	0,041	0,00025	R2						
160,00	32,3	4,8	10,042	0,043	0,00024							
170,00	32,0	4,5	10,044	0,045	0,00024							
180,00	32,3	4,8	10,047	0,048	0,00024							
190,00	32,1	4,6	10,049	0,050	0,00024							
200,00	31,6	4,1	10,052	0,053	0,00023							
210,00	31,5	4,0	10,054	0,055	0,00023							
220,00	31,2	3,7	10,056	0,057	0,00023							
230,00	31,2	3,7	10,058	0,059	0,00023							
240,00	30,6	3,1	10,060	0,061	0,00023							
250,00	30,7	3,2	10,063	0,064	0,00022							
260,00	30,3	2,8	10,065	0,066	0,00022							
270,00	29,9	2,4	10,067	0,068	0,00022							
280,00	30,0	2,5	10,069	0,070	0,00022							
290,00	29,3	1,8	10,071	0,072	0,00021							
300,00	29,8	2,3	10,073	0,074	0,00021							





t(s)	T(°C)	T <sub>estd</sub> (°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Experimento					V
-	28,3							Carcasa	Metal	Fecha	05/02/2013
10,00	37,1	8,8	10,078	-	0,00027			Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	12:15
20,00	39,6	11,3	10,082	0,004	0,00027			M. control	m <sub>4</sub>	Nº Prueba	2
30,00	40,0	11,7	10,085	0,007	0,00027			a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	25,4
40,00	40,3	12,0	10,088	0,010	0,00026			A.P.	100%		
50,00	40,5	12,2	10,091	0,013	0,00026			V'agua (l/min)	1	→	Inicial
60,00	40,7	12,4	10,094	0,016	0,00026			Δt (s)	0,01	t1	35,13
70,00	40,6	12,3	10,097	0,019	0,00026			ΔT (°C)	0,1	t2	27,49
80,00	39,9	11,6	10,100	0,022	0,00025			ΔV (m <sup>3</sup> )	0,001	t3	27,80
90,00	39,6	11,3	10,102	0,024	0,00025						1,0
100,00	39,7	11,4	10,105	0,027	0,00025						
110,00	39,6	11,3	10,107	0,029	0,00025			V=a·t <sup>2</sup> +b·t+c	V'=b·t+c	T=b·V'+c	Medio
120,00	39,2	10,9	10,110	0,032	0,00025	a		-1,2013E-07			V No
130,00	38,9	10,6	10,112	0,034	0,00024	b		0,000274158	-2,403E-07	3,09E+04	-
140,00	38,9	10,6	10,115	0,037	0,00024	c		0,083436941	0,000274	3,61148	
150,00	38,9	10,6	10,117	0,039	0,00024	R2					
160,00	38,6	10,3	10,120	0,042	0,00024						
170,00	38,7	10,4	10,122	0,044	0,00023						
180,00	38,6	10,3	10,124	0,046	0,00023						
190,00	38,8	10,5	10,126	0,048	0,00023						
200,00	39,0	10,7	10,129	0,051	0,00023						
210,00	38,6	10,3	10,131	0,053	0,00022						
220,00	38,6	10,3	10,133	0,055	0,00022						
230,00	38,7	10,4	10,135	0,057	0,00022						
240,00	38,1	9,8	10,137	0,059	0,00022						
250,00	38,3	10,0	10,139	0,061	0,00021						
260,00	38,4	10,1	10,141	0,063	0,00021						
270,00	38,5	10,2	10,143	0,065	0,00021						
280,00	38,7	10,4	10,146	0,068	0,00021						
290,00	38,9	10,6	10,148	0,070	0,00020						
300,00	39,0	10,7	10,150	0,072	0,00020						



t(s)	T(°C)	T <sub>estd</sub> (°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Experimento					V
-	28,8							Carcasa	Metal	Fecha	25/01/2013
10,00	35,9	7,1	10,155	-	0,00026			Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	12:35
20,00	40,8	12,0	10,158	0,003	0,00026			M. control	m <sub>4</sub>	Nº Prueba	3
30,00	41,3	12,5	10,161	0,006	0,00025			a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	25,5
40,00	41,9	13,1	10,164	0,009	0,00025			A.P.	100%		
50,00	41,8	13,0	10,167	0,012	0,00025			V'agua (l/min)	1	→	Inicial
60,00	42,1	13,3	10,170	0,015	0,00025			Δt (s)	0,01	t1	26,26
70,00	43,1	14,3	10,173	0,018	0,00025			ΔT (°C)	0,1	t2	26,95
80,00	42,6	13,8	10,176	0,021	0,00025			ΔV (m <sup>3</sup> )	0,001	t3	25,60
90,00	42,8	14,0	10,178	0,023	0,00025						1,1
100,00	42,2	13,4	10,181	0,026	0,00025						
110,00	41,9	13,1	10,184	0,029	0,00025			V=a·t <sup>2</sup> +b·t+c	V'=b·t+c	T=b·V'+c	Medio
120,00	42,2	13,4	10,186	0,031	0,00025	a		-4,6163E-08			12,5
130,00	42,2	13,4	10,189	0,034	0,00025	b		0,000257758	-9,233E-08	9,02E+04	2,3
140,00	41,9	13,1	10,191	0,036	0,00024	c		0,083102094	0,000258	- 9,28308	
150,00	41,6	12,8	10,194	0,039	0,00024	R2					
160,00	41,4	12,6	10,196	0,041	0,00024						
170,00	41,4	12,6	10,198	0,043	0,00024						
180,00	41,3	12,5	10,201	0,046	0,00024						
190,00	40,7	11,9	10,203	0,048	0,00024						
200,00	40,4	11,6	10,206	0,051	0,00024						
210,00	40,5	11,7	10,208	0,053	0,00024						
220,00	40,9	12,1	10,210	0,055	0,00024						
230,00	40,6	11,8	10,213	0,058	0,00024						
240,00	41,2	12,4	10,215	0,060	0,00024						
250,00	41,0	12,2	10,217	0,062	0,00023						
260,00	40,5	11,7	10,219	0,064	0,00023						
270,00	40,6	11,8	10,222	0,067	0,00023						
280,00	40,0	11,2	10,224	0,069	0,00023						
290,00	40,2	11,4	10,226	0,071	0,00023						
300,00	40,5	11,7	10,228	0,073	0,00023						

Incremento de temperatura (°C)

Caudal (m<sup>3</sup>/s)

$y = 90172x - 9,2831$   
 $R^2 = 0,6766$

t(s)	T(°C)	T <sub>estd</sub> (°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Experimento					V
-	22,9							Carcasa	Metal	Fecha	06/02/2013
10,00	23,2	0,3	10,235	-	0,00027			Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	10:35
20,00	24,5	1,6	10,239	0,004	0,00027			M. control	m <sub>4</sub>	Nº Prueba	4
30,00	28,4	5,5	10,243	0,008	0,00027			a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	22,1
40,00	28,7	5,8	10,246	0,011	0,00026			A.P.	100%		
50,00	28,7	5,8	10,248	0,013	0,00026			V'agua (l/min)	2,5	→	Inicial
60,00	28,4	5,5	10,252	0,017	0,00026			Δt (s)	0,01	t1	13,06
70,00	28,3	5,4	10,254	0,019	0,00025			ΔT (°C)	0,1	t2	12,36
80,00	28,2	5,3	10,256	0,021	0,00025			ΔV (m <sup>3</sup> )	0,001	t3	10,30
90,00	28,1	5,2	10,260	0,025	0,00025						2,5
100,00	27,7	4,8	10,262	0,027	0,00024						
110,00	27,8	4,9	10,264	0,029	0,00024			V=a·t <sup>2</sup> +b·t+c	V'=b·t+c	T=b·V'+c	Medio
120,00	27,7	4,8	10,266	0,031	0,00024	a		-1,7408E-07			14,25
130,00	27,8	4,9	10,269	0,034	0,00023	b		0,000278461	-3,482E-07	2,84E+04	2,6
140,00	27,5	4,6	10,271	0,036	0,00023	c		0,081115639	0,000278	- 1,87506	
150,00	27,6	4,7	10,273	0,038	0,00023	R2					
160,00	27,3	4,4	10,275	0,040	0,00022						
170,00	27,1	4,2	10,277	0,042	0,00022						
180,00	27,1	4,2	10,280	0,045	0,00022						
190,00	26,9	4,0	10,282	0,047	0,00021						
200,00	27,1	4,2	10,284	0,049	0,00021						
210,00	26,6	3,7	10,286	0,051	0,00021						
220,00	26,5	3,6	10,288	0,053	0,00020						
230,00	26,5	3,6	10,290	0,055	0,00020						
240,00	26,6	3,7	10,292	0,057	0,00019						
250,00	26,7	3,8	10,294	0,059	0,00019						
260,00	26,3	3,4	10,296	0,061	0,00019						
270,00	26,3	3,4	10,298	0,063	0,00018						
280,00	26,1	3,2	10,300	0,065	0,00018						
290,00	26,2	3,3	10,301	0,066	0,00018						
300,00	26,2	3,3	10,303	0,068	0,00017						

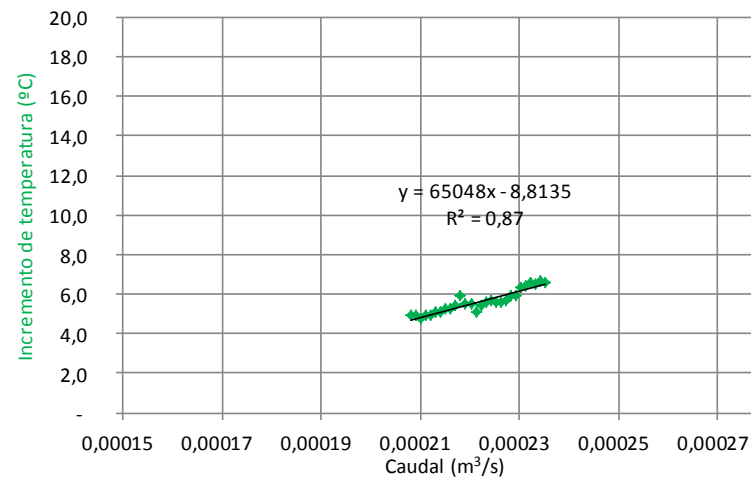
  

Incremento de temperatura (°C)

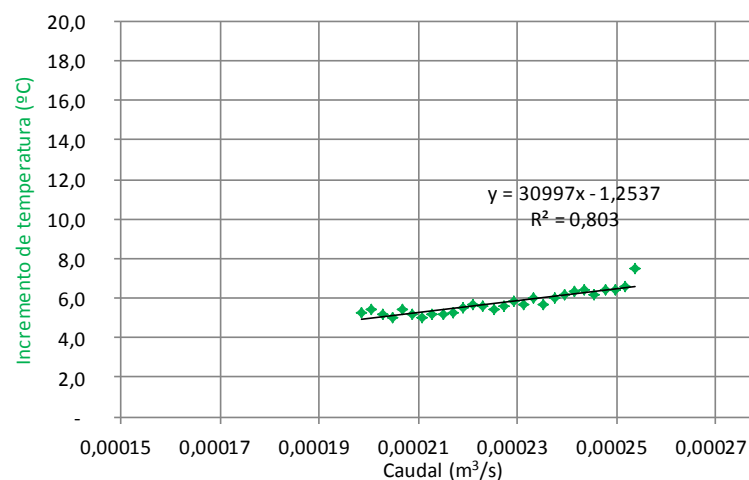
Caudal (m<sup>3</sup>/s)

$y = 28392x - 1,8751$   
 $R^2 = 0,965$

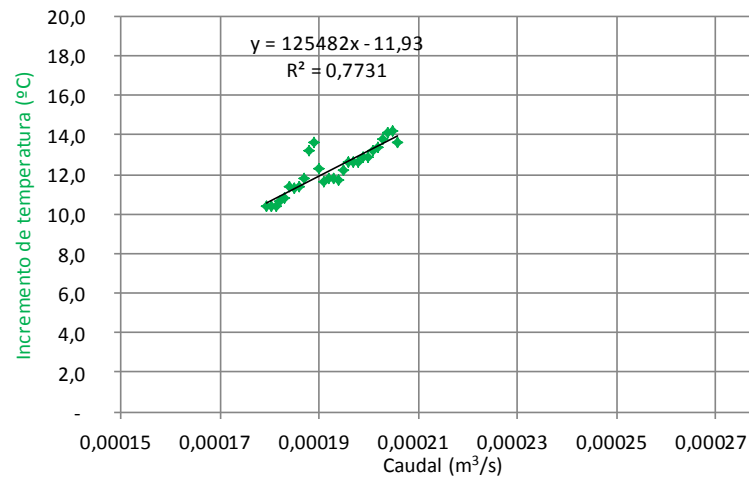
t(s)	T(°C)	T <sub>estd</sub> (°C)	V(m³)	V <sub>estd</sub> (m³)	V'(m³/s)	Experimento						V
-	21,4							Carcasa	Metal	Fecha	06/02/2013	
10,00	25,3	3,9	10,309	-	0,00024			Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	10:51	
20,00	27,7	6,3	10,312	0,003	0,00024			M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	5	
30,00	28,0	6,6	10,314	0,005	0,00024			a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	22,2	
40,00	28,1	6,7	10,317	0,008	0,00023			A.P.	100%			
50,00	27,9	6,5	10,320	0,011	0,00023			V'agua (l/min)	2,5	→	Inicial	
60,00	28,0	6,6	10,323	0,014	0,00023			Δt (s)	0,01	t1	11,90	
70,00	27,8	6,4	10,326	0,017	0,00023			ΔT (°C)	0,1	t2	12,38	
80,00	27,7	6,3	10,328	0,019	0,00023			ΔV (m³)	0,001	t3	12,20	
90,00	27,3	5,9	10,330	0,021	0,00023						2,5	
100,00	27,3	5,9	10,333	0,024	0,00023							
110,00	27,1	5,7	10,335	0,026	0,00023			V=a·t²+b·t+c	V'=b·t+c	T=b·V'+c	Medio	
120,00	27,0	5,6	10,338	0,029	0,00023	a		-5,0508E-08			13,8	
130,00	27,0	5,6	10,340	0,031	0,00023	b		0,000238414	-1,010E-07	6,50E+04	2,5	
140,00	27,1	5,7	10,343	0,034	0,00022	c		0,076390694	0,000238	- 8,81349		
150,00	27,0	5,6	10,345	0,036	0,00022	R2						
160,00	26,8	5,4	10,347	0,038	0,00022							
170,00	26,5	5,1	10,349	0,040	0,00022							
180,00	26,9	5,5	10,351	0,042	0,00022							
190,00	26,9	5,5	10,353	0,044	0,00022							
200,00	27,3	5,9	10,356	0,047	0,00022							
210,00	26,8	5,4	10,358	0,049	0,00022							
220,00	26,7	5,3	10,360	0,051	0,00022							
230,00	26,7	5,3	10,362	0,053	0,00022							
240,00	26,5	5,1	10,364	0,055	0,00021							
250,00	26,5	5,1	10,366	0,057	0,00021							
260,00	26,3	4,9	10,368	0,059	0,00021							
270,00	26,3	4,9	10,370	0,061	0,00021							
280,00	26,2	4,8	10,372	0,063	0,00021							
290,00	26,3	4,9	10,374	0,065	0,00021							
300,00	26,3	4,9	10,376	0,067	0,00021							



t(s)	T(°C)	T <sub>estd</sub> (°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Experimento					V
-	21,1							Carcasa	Metal	Fecha	06/02/2013
10,00	25,9	4,8	10,381	-	0,00026			Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	11:21
20,00	27,9	6,8	10,384	0,003	0,00026			M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	6
30,00	28,6	7,5	10,387	0,006	0,00025			a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	23,1
40,00	27,7	6,6	10,391	0,010	0,00025			A.P.	100%		
50,00	27,5	6,4	10,394	0,013	0,00025			V'agua (l/min)	2,5	→	Inicial
60,00	27,5	6,4	10,396	0,015	0,00025			Δt (s)	0,01	t1	11,48
70,00	27,3	6,2	10,399	0,018	0,00025			ΔT (°C)	0,1	t2	11,60
80,00	27,5	6,4	10,402	0,021	0,00024			ΔV (m <sup>3</sup> )	0,001	t3	12,20
90,00	27,4	6,3	10,404	0,023	0,00024						2,6
100,00	27,3	6,2	10,407	0,026	0,00024						
110,00	27,1	6,0	10,409	0,028	0,00024			V=a·t <sup>2</sup> +b·t+c	V'=b·t+c	T=b·V'+c	Medio
120,00	26,8	5,7	10,411	0,030	0,00024	a		-1,0206E-07			14,5
130,00	27,1	6,0	10,414	0,033	0,00023	b		0,000259864	-2,041E-07	3,10E+04	2,6
140,00	26,8	5,7	10,416	0,035	0,00023	c		0,079924943	0,000260	- 1,25374	
150,00	26,9	5,8	10,418	0,037	0,00023	R2					
160,00	26,7	5,6	10,421	0,040	0,00023						
170,00	26,5	5,4	10,423	0,042	0,00023						
180,00	26,7	5,6	10,425	0,044	0,00022						
190,00	26,8	5,7	10,427	0,046	0,00022						
200,00	26,6	5,5	10,429	0,048	0,00022						
210,00	26,4	5,3	10,432	0,051	0,00022						
220,00	26,3	5,2	10,434	0,053	0,00021						
230,00	26,3	5,2	10,436	0,055	0,00021						
240,00	26,1	5,0	10,438	0,057	0,00021						
250,00	26,3	5,2	10,440	0,059	0,00021						
260,00	26,5	5,4	10,442	0,061	0,00021						
270,00	26,1	5,0	10,444	0,063	0,00020						
280,00	26,3	5,2	10,446	0,065	0,00020						
290,00	26,5	5,4	10,448	0,067	0,00020						
300,00	26,4	5,3	10,450	0,069	0,00020						



t(s)	T(°C)	T <sub>estd</sub> (°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Experimento					V
-	19,7							Carcasa	Metal	Fecha	07/02/2013
10,00	25,6	5,9	10,538	-	0,00021			Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	9:45
20,00	29,9	10,2	10,540	0,002	0,00021			M. control	m <sub>3</sub>	Nº Prueba	7
30,00	33,3	13,6	10,543	0,005	0,00021			a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	20,5
40,00	33,9	14,2	10,545	0,007	0,00020			A.P.	100%		
50,00	33,8	14,1	10,548	0,010	0,00020			V'agua (l/min)	1	→	Inicial
60,00	33,5	13,8	10,550	0,012	0,00020			Δt (s)	0,01	t1	27,64
70,00	33,1	13,4	10,552	0,014	0,00020			ΔT (°C)	0,1	t2	25,67
80,00	32,9	13,2	10,555	0,017	0,00020			ΔV (m <sup>3</sup> )	0,001	t3	28,50
90,00	32,6	12,9	10,557	0,019	0,00020						1,1
100,00	32,6	12,9	10,559	0,021	0,00020						
110,00	32,3	12,6	10,561	0,023	0,00020			V=a·t <sup>2</sup> +b·t+c	V'=b·t+c	T=b·V'+c	Medio
120,00	32,3	12,6	10,563	0,025	0,00020	a		-4,9442E-08			5,5
130,00	32,3	12,6	10,565	0,027	0,00020	b		0,0002089	-9,888E-08	1,25E+05	1,0
140,00	31,9	12,2	10,567	0,029	0,00020	c		0,066604273	0,000209	- 11,93013	
150,00	31,4	11,7	10,569	0,031	0,00019	R2					
160,00	31,5	11,8	10,571	0,033	0,00019						
170,00	31,5	11,8	10,573	0,035	0,00019						
180,00	31,3	11,6	10,575	0,037	0,00019						
190,00	32,0	12,3	10,577	0,039	0,00019						
200,00	33,3	13,6	10,579	0,041	0,00019						
210,00	32,9	13,2	10,581	0,043	0,00019						
220,00	31,5	11,8	10,582	0,044	0,00019						
230,00	31,1	11,4	10,584	0,046	0,00019						
240,00	31,0	11,3	10,586	0,048	0,00019						
250,00	31,1	11,4	10,588	0,050	0,00018						
260,00	30,5	10,8	10,590	0,052	0,00018						
270,00	30,3	10,6	10,591	0,053	0,00018						
280,00	30,1	10,4	10,593	0,055	0,00018						
290,00	30,1	10,4	10,594	0,056	0,00018						
300,00	30,1	10,4	10,596	0,058	0,00018						



t(s)	T(°C)	T <sub>estd</sub> (°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Experimento					V
-	20,1							Carcasa	Metal	Fecha	25/01/2013
10,00	26,3	6,2	10,600	-	0,00023			Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	10:01
20,00	30,9	10,8	10,603	0,003	0,00021			M. control	m <sub>3</sub>	Nº Prueba	8
30,00	32,3	12,2	10,606	0,006	0,00021			a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	21,1
40,00	34,2	14,1	10,608	0,008	0,00020			A.P.	100%		
50,00	35,5	15,4	10,611	0,011	0,00020			V'agua (l/min)	1	→	Inicial
60,00	33,9	13,8	10,613	0,013	0,00020			Δt (s)	0,01	t1	24,50
70,00	33,1	13,0	10,616	0,016	0,00020			ΔT (°C)	0,1	t2	27,38
80,00	32,3	12,2	10,618	0,018	0,00020			ΔV (m <sup>3</sup> )	0,001	t3	28,30
90,00	31,5	11,4	10,620	0,020	0,00020						1,1
100,00	31,3	11,2	10,623	0,023	0,00020						
110,00	31,9	11,8	10,625	0,025	0,00020			V=a·t <sup>2</sup> +b·t+c	V'=b·t+c	T=b·V'+c	Medio
120,00	31,5	11,4	10,627	0,027	0,00020	a		-1,1605E-07			6,25
130,00	30,7	10,6	10,629	0,029	0,00020	b		0,000232359	-2,321E-07	1,37E+05	1,1
140,00	31,2	11,1	10,631	0,031	0,00020	c		0,069862803	0,000232	- 15,12045	
150,00	31,1	11,0	10,633	0,033	0,00019	R2					
160,00	30,9	10,8	10,635	0,035	0,00019						
170,00	30,4	10,3	10,637	0,037	0,00019						
180,00	31,1	11,0	10,639	0,039	0,00019						
190,00	31,5	11,4	10,641	0,041	0,00019						
200,00	31,6	11,5	10,642	0,042	0,00019						
210,00	30,7	10,6	10,644	0,044	0,00019						
220,00	30,3	10,2	10,646	0,046	0,00019						
230,00	30,2	10,1	10,648	0,048	0,00019						
240,00	30,5	10,4	10,650	0,050	0,00019						
250,00	30,3	10,2	10,651	0,051	0,00018						
260,00	30,4	10,3	10,653	0,053	0,00018						
270,00	30,1	10,0	10,655	0,055	0,00018						
280,00	30,1	10,0	10,656	0,056	0,00018						
290,00	30,2	10,1	10,658	0,058	0,00018						
300,00	30,1	10,0	10,659	0,059	0,00018						

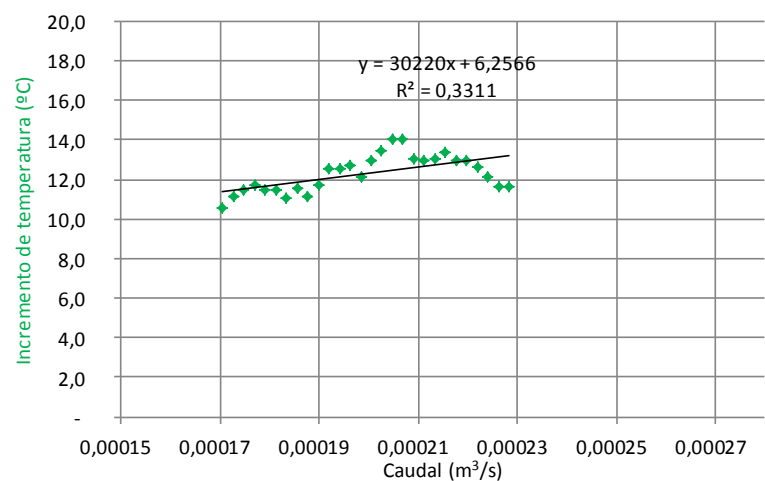
  

Incremento de temperatura (°C)

$y = 137134x - 15,12$   
 $R^2 = 0,667$

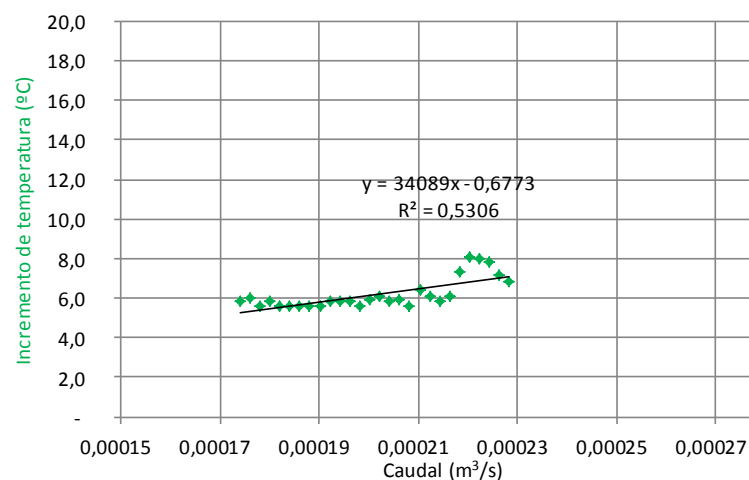
Caudal (m<sup>3</sup>/s)

t(s)	T(°C)	T <sub>estd</sub> (°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Experimento		V
-	20,1					Carcasa	Metal	Fecha 25/01/2013
10,00	28,1	8,0	10,664	-	0,00023	Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora 10:21
20,00	31,1	11,0	10,667	0,003	0,00023	M. control	m <sub>3</sub>	Nº Prueba 9
30,00	31,7	11,6	10,670	0,006	0,00023	a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C) 22
40,00	31,7	11,6	10,673	0,009	0,00023	A.P.	100%	
50,00	32,2	12,1	10,675	0,011	0,00022	V'agua (l/min)	1	→ Inicial
60,00	32,7	12,6	10,678	0,014	0,00022	Δt (s)	0,01	t1 23,43
70,00	33,0	12,9	10,680	0,016	0,00022	ΔT (°C)	0,1	t2 25,77
80,00	33,0	12,9	10,682	0,018	0,00022	ΔV (m <sup>3</sup> )	0,001	t3 29,70
90,00	33,4	13,3	10,684	0,020	0,00022			1,1
100,00	33,1	13,0	10,687	0,023	0,00021			
110,00	33,0	12,9	10,689	0,025	0,00021	V=a·t <sup>2</sup> +b·t+c	V'=b·t+c	T=b·V'+c
120,00	33,1	13,0	10,691	0,027	0,00021	a	-1,0725E-07	
130,00	34,1	14,0	10,693	0,029	0,00021	b	0,000234867	-2,145E-07
140,00	34,1	14,0	10,695	0,031	0,00020	c	0,071285528	0,000235
150,00	33,5	13,4	10,697	0,033	0,00020	R2		6,25655
160,00	33,0	12,9	10,700	0,036	0,00020			
170,00	32,2	12,1	10,702	0,038	0,00020			
180,00	32,8	12,7	10,704	0,040	0,00020			
190,00	32,6	12,5	10,706	0,042	0,00019			
200,00	32,6	12,5	10,708	0,044	0,00019			
210,00	31,8	11,7	10,709	0,045	0,00019			
220,00	31,2	11,1	10,711	0,047	0,00019			
230,00	31,6	11,5	10,713	0,049	0,00019			
240,00	31,2	11,1	10,715	0,051	0,00018			
250,00	31,5	11,4	10,717	0,053	0,00018			
260,00	31,5	11,4	10,718	0,054	0,00018			
270,00	31,8	11,7	10,720	0,056	0,00018			
280,00	31,5	11,4	10,722	0,058	0,00017			
290,00	31,2	11,1	10,723	0,059	0,00017			
300,00	30,6	10,5	10,724	0,060	0,00017			

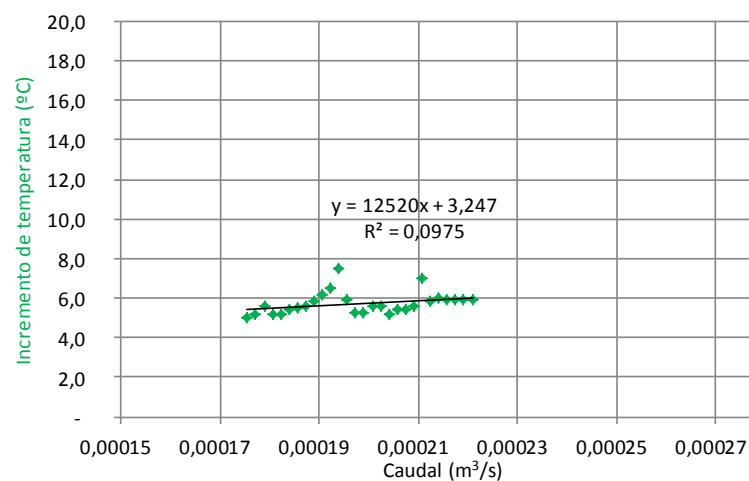




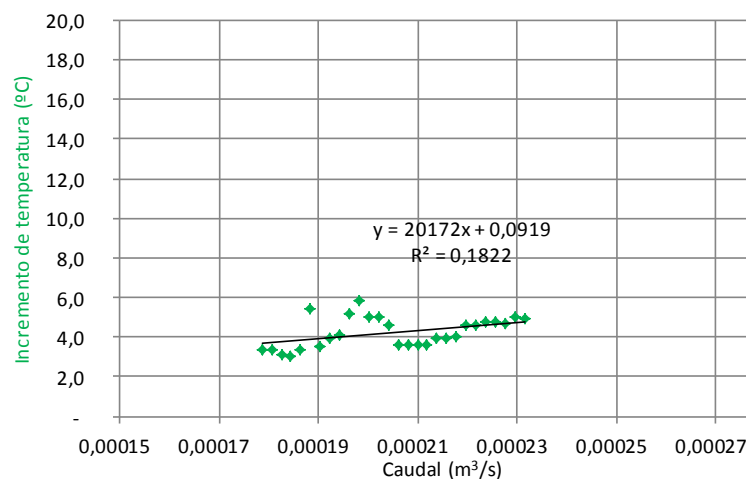
t(s)	T(°C)	T <sub>estd</sub> (°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Experimento					V
-	21,3							Carcasa	Metal	Fecha	06/02/2013
10,00	26,8	5,5	10,730	-	0,00023			Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	10:48
20,00	27,4	6,1	10,733	0,003	0,00023			M. control	m <sub>3</sub>	Nº Prueba	10
30,00	28,1	6,8	10,736	0,006	0,00023			a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	22,1
40,00	28,5	7,2	10,738	0,008	0,00023			A.P.	100%		
50,00	29,1	7,8	10,741	0,011	0,00022			V'agua (l/min)	2,5	→	Inicial
60,00	29,3	8,0	10,743	0,013	0,00022			Δt (s)	0,01	t1	13,14
70,00	29,4	8,1	10,746	0,016	0,00022			ΔT (°C)	0,1	t2	12,59
80,00	28,6	7,3	10,748	0,018	0,00022			ΔV (m <sup>3</sup> )	0,001	t3	12,00
90,00	27,4	6,1	10,751	0,021	0,00022						2,4
100,00	27,1	5,8	10,753	0,023	0,00021						
110,00	27,4	6,1	10,755	0,025	0,00021			V=a·t <sup>2</sup> +b·t+c	V'=b·t+c	T=b·V'+c	Medio
120,00	27,7	6,4	10,757	0,027	0,00021	a		-1,0079E-07			12,5
130,00	26,9	5,6	10,760	0,030	0,00021	b		0,000234482	-2,016E-07	3,41E+04	2,3
140,00	27,2	5,9	10,762	0,032	0,00021	c		0,071638384	0,000234	- 0,67733	
150,00	27,1	5,8	10,764	0,034	0,00020	R2					
160,00	27,4	6,1	10,766	0,036	0,00020						
170,00	27,2	5,9	10,768	0,038	0,00020						
180,00	26,9	5,6	10,770	0,040	0,00020						
190,00	27,1	5,8	10,772	0,042	0,00020						
200,00	27,1	5,8	10,774	0,044	0,00019						
210,00	27,1	5,8	10,775	0,045	0,00019						
220,00	26,9	5,6	10,777	0,047	0,00019						
230,00	26,9	5,6	10,779	0,049	0,00019						
240,00	26,9	5,6	10,781	0,051	0,00019						
250,00	26,9	5,6	10,783	0,053	0,00018						
260,00	26,9	5,6	10,785	0,055	0,00018						
270,00	27,1	5,8	10,786	0,056	0,00018						
280,00	26,9	5,6	10,788	0,058	0,00018						
290,00	27,3	6,0	10,790	0,060	0,00018						
300,00	27,1	5,8	10,791	0,061	0,00017						

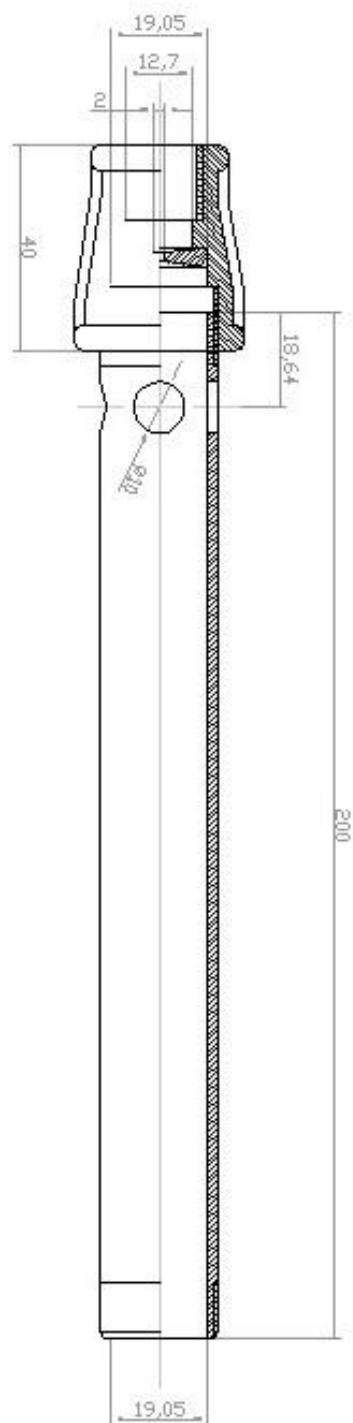


t(s)	T(°C)	T <sub>estd</sub> (°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Experimento					V
-	22,3							Carcasa	Metal	Fecha	06/02/2013
10,00	27,1	4,8	10,861	-	0,00022			Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	11:40
20,00	28,1	5,8	10,864	0,003	0,00022			M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	11
30,00	28,2	5,9	10,867	0,006	0,00022			a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	23,2
40,00	28,2	5,9	10,869	0,008	0,00022			A.P.	100%		
50,00	28,2	5,9	10,872	0,011	0,00022			V'agua (l/min)	2,5	→	Inicial
60,00	28,2	5,9	10,874	0,013	0,00022			Δt (s)	0,01	t1	14,63
70,00	28,3	6,0	10,876	0,015	0,00021			ΔT (°C)	0,1	t2	13,99
80,00	28,1	5,8	10,879	0,018	0,00021			ΔV (m <sup>3</sup> )	0,001	t3	13,80
90,00	29,3	7,0	10,881	0,020	0,00021						2,1
100,00	27,9	5,6	10,883	0,022	0,00021						
110,00	27,7	5,4	10,885	0,024	0,00021			V=a·t <sup>2</sup> +b·t+c	V'=b·t+c	T=b·V'+c	Medio
120,00	27,7	5,4	10,887	0,026	0,00021	a		-8,3939E-08			11,75
130,00	27,5	5,2	10,890	0,029	0,00020	b		0,000225914	-1,679E-07	1,25E+04	2,1
140,00	27,9	5,6	10,892	0,031	0,00020	c		0,069841474	0,000226	3,24697	
150,00	27,9	5,6	10,894	0,033	0,00020	R2					
160,00	27,6	5,3	10,896	0,035	0,00020						
170,00	27,6	5,3	10,898	0,037	0,00020						
180,00	28,2	5,9	10,900	0,039	0,00020						
190,00	29,8	7,5	10,902	0,041	0,00019						
200,00	28,8	6,5	10,903	0,042	0,00019						
210,00	28,5	6,2	10,905	0,044	0,00019						
220,00	28,1	5,8	10,907	0,046	0,00019						
230,00	27,9	5,6	10,909	0,048	0,00019						
240,00	27,8	5,5	10,911	0,050	0,00019						
250,00	27,7	5,4	10,913	0,052	0,00018						
260,00	27,5	5,2	10,914	0,053	0,00018						
270,00	27,5	5,2	10,916	0,055	0,00018						
280,00	27,9	5,6	10,918	0,057	0,00018						
290,00	27,5	5,2	10,920	0,059	0,00018						
300,00	27,3	5,0	10,921	0,060	0,00018						

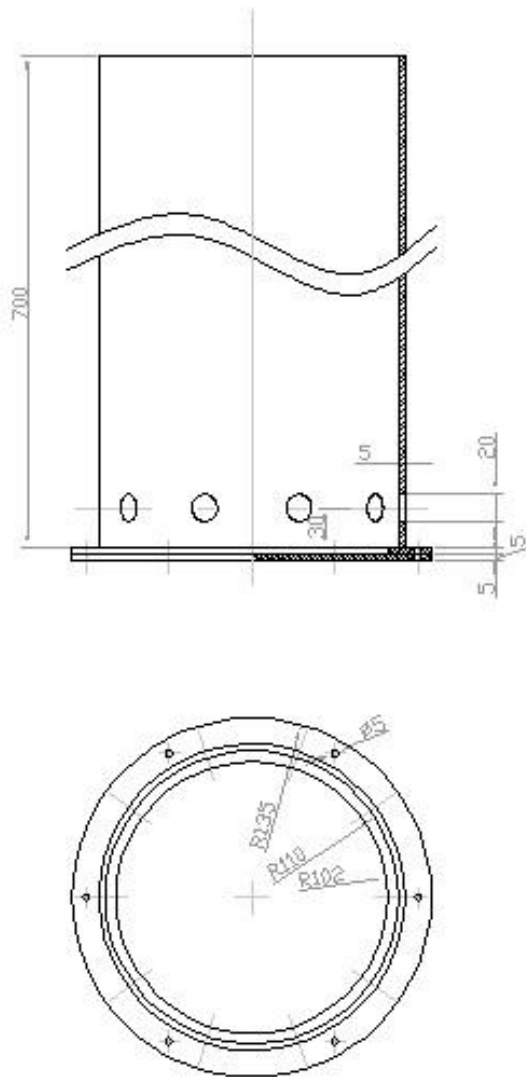


t(s)	T(°C)	T <sub>estd</sub> (°C)	V(m <sup>3</sup> )	V <sub>estd</sub> (m <sup>3</sup> )	V'(m <sup>3</sup> /s)	Experimento						V
-	22,3							Carcasa	Metal	Fecha	06/02/2013	
10,00	26,1	3,8	10,926	-	0,00024			Quemador	QS <sub>1/2</sub>	Hora	12:09	
20,00	27,1	4,8	10,929	0,003	0,00023			M. control	m <sub>1</sub>	Nº Prueba	12	
30,00	27,2	4,9	10,932	0,006	0,00023			a <sub>t</sub> (mm)	13	T <sub>ext</sub> (°C)	24	
40,00	27,3	5,0	10,935	0,009	0,00023			A.P.	100%			
50,00	27,0	4,7	10,937	0,011	0,00023			V' <sub>agua</sub> (l/min)	2,5	→	Inicial	
60,00	27,1	4,8	10,940	0,014	0,00023			Δt (s)	0,01	t1	11,91	
70,00	27,1	4,8	10,942	0,016	0,00022			ΔT (°C)	0,1	t2	12,12	
80,00	26,9	4,6	10,945	0,019	0,00022			ΔV (m <sup>3</sup> )	0,001	t3	11,60	
90,00	26,9	4,6	10,947	0,021	0,00022						2,5	
100,00	26,3	4,0	10,949	0,023	0,00022							
110,00	26,2	3,9	10,952	0,026	0,00022			V=a·t <sup>2</sup> +b·t+c	V'=b·t+c	T=b·V'+c	Medio	
120,00	26,2	3,9	10,954	0,028	0,00021	a		-9,7953E-08			V	14
130,00	25,9	3,6	10,956	0,030	0,00021	b		0,000237394	-1,959E-07	2,02E+04		2,5
140,00	25,9	3,6	10,958	0,032	0,00021	c		0,072707926	0,000237	0,09190		
150,00	25,9	3,6	10,960	0,034	0,00021	R2						
160,00	25,9	3,6	10,962	0,036	0,00021							
170,00	26,9	4,6	10,964	0,038	0,00020							
180,00	27,3	5,0	10,966	0,040	0,00020							
190,00	27,3	5,0	10,968	0,042	0,00020							
200,00	28,1	5,8	10,970	0,044	0,00020							
210,00	27,5	5,2	10,972	0,046	0,00020							
220,00	26,4	4,1	10,974	0,048	0,00019							
230,00	26,2	3,9	10,976	0,050	0,00019							
240,00	25,8	3,5	10,978	0,052	0,00019							
250,00	27,7	5,4	10,980	0,054	0,00019							
260,00	25,7	3,4	10,982	0,056	0,00019							
270,00	25,3	3,0	10,983	0,057	0,00018							
280,00	25,4	3,1	10,985	0,059	0,00018							
290,00	25,7	3,4	10,987	0,061	0,00018							
300,00	25,7	3,4	10,988	0,062	0,00018							

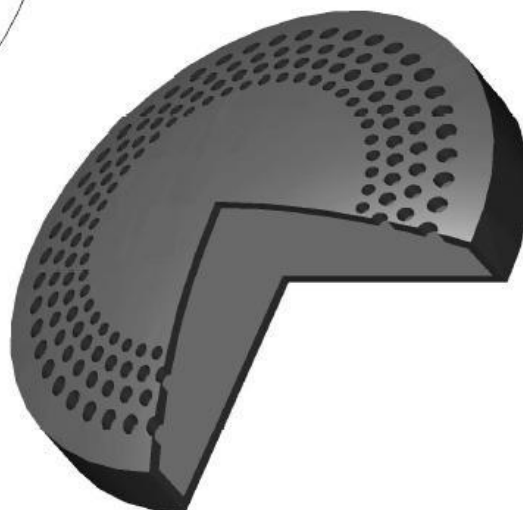
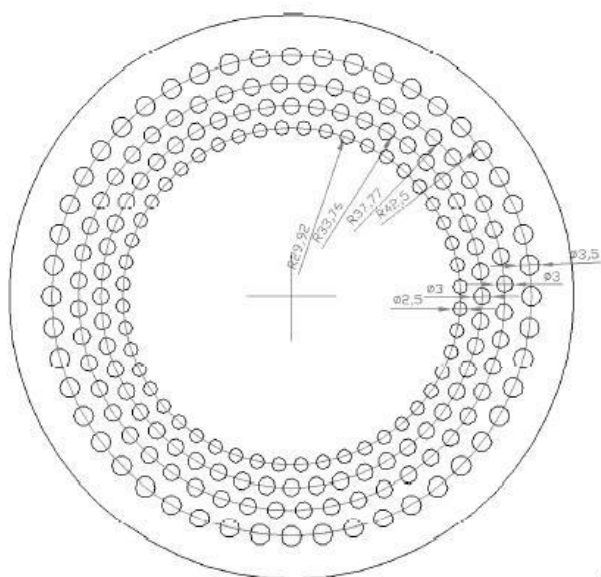
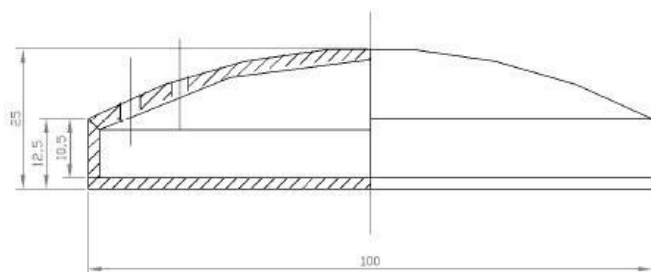


*C.5. Planos. Inyector*

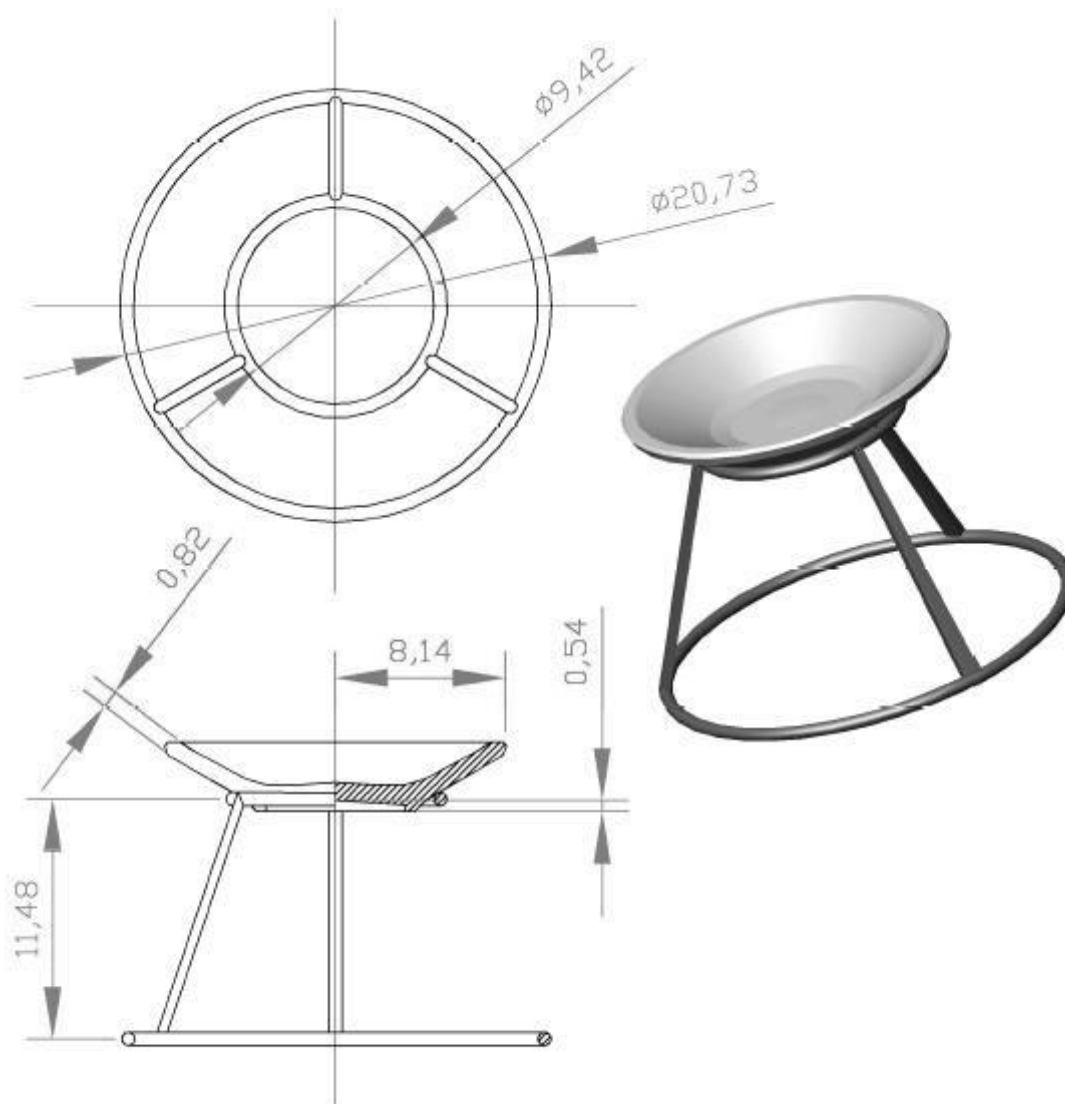
### C.6. Planos. Carcasa de metal



## C.7. Planos. Quemador de caja



C.8. Planos. Soporte para quemador de soplete



### D.1. MATLAB. Cálculo de las propiedades del biogás

Calcula las propiedades de biogás para una temperatura de entrada y una composición del biogás y para una altitud determinada.

#### CalcPropBiogas.m

```
%Cálculo de las propiedades del biogás para una temperatura de entrada
%T_bio en °C, una composición de biogás de x_CO, y Altitud

%Las salidas son:
%Dens_bio:Densidad en kg/m3
%Cp_bio:Calor específico en J/kg.°C
%k_bio:Conductividad térmica en W/m.°C
%VisDin_bio:Viscosidad dinámica en kg/m.s

clear Dens_bio Cp_bio k_bio VisDin_bio Pr_bio

T_bio_K=T_bio+273.15; %Pasamos la temperatura de entrada a K ya que las ecuaciones estan
calculadas para esa escala

%Dióxido de Carbono
Dens_CO=-0.000000022090909*T_bio_K^3+0.000036948051948*T_bio_K^2-
0.022391123376623*T_bio_K+5.794829870129880;
Cp_CO=0.000002404040404*T_bio_K^3-
0.003710389610390*T_bio_K^2+2.548167388167380*T_bio_K+365.264069264071000;
k_CO=-0.000000000020970*T_bio_K^3+0.000000066903030*T_bio_K^2+0.000041476017316*T_bio_K-
0.001335852813853;
VisDin_CO=0.000000000000013*T_bio_K^3-
0.000000000036853*T_bio_K^2+0.000000064780707*T_bio_K+-0.000001499164502;

%Metano
Dens_CH=-1.25291375288077E-10*T_bio_K^4+1.32718207714121E-07*T_bio_K^3-
0.0000441176184907245*T_bio_K^2+0.00197153781364865*T_bio_K+1.4633085858885;
Cp_CH=8.01282051283757E-08*T_bio_K^4-
0.000110899378399582*T_bio_K^3+0.065122231934823*T_bio_K^2-
15.4937894328074*T_bio_K+3368.25484848617;
k_CH=(-1.16550116554301E-11)*T_bio_K^4+(1.26003626008824E-08)*T_bio_K^3+(-
4.81332556356698E-06)*T_bio_K^2+(0.000879786972336648)*T_bio_K+(-0.0424282828321039);
VisDin_CH=(2.62237762231274E-14)*T_bio_K^4+(-3.3780108779305E-
11)*T_bio_K^3+(1.62409673655948E-08)*T_bio_K^2+(-3.42236790979135E-
06)*T_bio_K+(0.000275909090903206);

%La reacción dada es
%[x_CO*CO2+CH4]+2(1+x_air)[O2+3.76N2]---->(1+x_CO)CO2+2H2O+2x_airO2+7.52(1+x_air)N2
%La cantidad de moles totales de el biogás es es
%(1+x_CO)

P_CO_bio=x_CO/(1+x_CO);
P_CH_bio=1/(1+x_CO);

Dens_bio_0=P_CO_bio*Dens_CO+P_CH_bio*Dens_CH;
Cp_bio=P_CO_bio*Cp_CO+P_CH_bio*Cp_CH;
k_bio=P_CO_bio*k_CO+P_CH_bio*k_CH;
VisDin_bio=P_CO_bio*VisDin_CO+P_CH_bio*VisDin_CH;

%Corrección de la densidad por la altitud
Dens_bio=Dens_bio_0*((288.15+Altitud*(-0.0065))/288.15)^(9.81/(287*(-0.0065)));
```

### D.2. MATLAB. Cálculo de las propiedades del aire

Calcula las propiedades del aire para una temperatura de entrada y altitud determinada.

#### CalcPropAire.m

```
%Cálculo de las propiedades del biogás para una temperatura de entrada
%T_air en °C y Altitud

%Las salidas son:
%Dens_bio:Densidad en kg/m3
%Cp_bío:Calor específico en J/kg.°C
```



```

%k_bio:Conductividad térmica en W/m.°C
%VisDin_bio:Viscosidad dinámica en kg/m.s
%Pr_bio:Numero de Prandtl

clear Dens_air Cp_air k_air VisDin_air Pr_air

%Aire
Dens_air_0=(8.64342698488746E-11)*T_air^4+(-5.42624360543039E-
08)*T_air^3+(0.0000175340784978226)*T_air^2+(-
0.00475638352922442)*T_air+(1.29207447920953);
Cp_air=(-2.81906329593979E-08)*T_air^4+(0.0000122976924719294)*T_air^3+(-
0.00114565657129652)*T_air^2+(0.0451114526937135)*T_air+(1006.27847721197);
k_air=(0)*T_air^4+(0)*T_air^3+(-2.4183531190699E-
08)*T_air^2+(0.0000755994031794932)*T_air+(0.0236337249747268);
VisDin_air=(-7.80484771028543E-16)*T_air^4+(2.16081593067673E-13)*T_air^3+(-
4.65807801103772E-11)*T_air^2+(4.84599320294397E-08)*T_air+(0.0000172989982822037);
Pr_air=(-2.65665914018642E-11)*T_air^4+(1.13846333667127E-08)*T_air^3+(-9.74740681540971E-
07)*T_air^2+(-0.000242804480692652)*T_air+(0.736189471493745);

%Corrección de la densidad por la altitud
Dens_air=Dens_air_0*((288.15+Altitud*(-0.0065))/288.15)^(-(9.81/(287*(-0.0065))));

```

### D.3. MATLAB. Calculo de las propiedades de una mezcla biogás-aire

Calcula las propiedades para una mezcla de aire a su temperatura y biogás a su temperatura, una proporción entre volúmenes de aire y biogás y una altitud. Se requiere cargar los programas D.1 y D.2.

#### CalcPropBioAir.m

```

%Cálculo de las propiedades de una mezcla de aire a T_air y biogás a T_bio dada su
%proporción entre volúmenes aire y de biogás e y la Altitud;

%Las salidas son:
%Dens_m:Densidad en kg/m3
%Cp_m:Calor específico en J/kg.°C
%k_m:Conductividad térmica en W/m.°C
%VisDin_m:Viscosidad dinámica en kg/m.s

clear Dens_m Cp_m k_m VisDin_m Pr_m

CalcPropBiogas;
CalcPropAire;

P_bio=1/(1+e);
P_air=e/(1+e);

Dens_m=P_bio*Dens_bio+P_air*Dens_air;
Cp_m=P_bio*Cp_bio+P_air*Cp_air;
k_m=P_bio*k_bio+P_air*k_air;
VisDin_m=P_bio*VisDin_bio+P_air*VisDin_air;

```

### D.4. MATLAB. Calculo quemador

Modelo del quemador. Para implementarlo es necesario cargar los ficheros de D.1, D.2 y D.3.

#### Quemador\_x.m

```

%Cálculo quemador
%Todas las unidades en SI, excepto temperaturas en°C
clear
clc

%-----Parámetros variables-----
Altitud=3600; %Altitud sobre el nivel del mar (msnm)
T_air=10; %Temperatura del aire que rodea al inyector (°C)
Cdl_bio=0.00042; %Caudal de biogás utilizado (m3/s)
T_bio=10; %Temperatura del biogás a la entrada del inyector (°C)
prp_CH4_bio=55/100; %Porcentaje de metano en el biogás utilizado

%-----Parámetros preestablecidos-----
Dens_0=1.29; %Densidad del aire a 1 atm y 0°C(referencia) (kg/m3)
Cf=0.9; %Coeficiente de flujo del inyector

```

```

pm_i=1000; %Presión manométrica previa al paso por el inyector (Pa)
v_p=0.25; %Velocidad de propagación de la llama para el biogás (m/s)
g=9.81; %Aceleración de la gravedad (m/s2)
x_air=0; %Exceso de aire en la reacción

prp_CO_bio=1-prp_CH4_bio;

disp('-----Datos Problema-----')
disp('Composición del biogás')
disp('% de Dióxido de Carbono')
prp_CO_bio
disp('% de Metano')
prp_CH4_bio
disp('Temperatura del biogás (°C)')
T_bio
disp('Caudal de biogás (m3/s)')
Cdl_bio
disp('Temperatura del aire (°C)')
T_air
disp('Exceso de aire en la reacción')
x_air
disp('Coeficiente de flujo del inyector')
Cf
disp('Presión manométrica previa al inyector')
pm_i
disp('Altitud sobre el nivel del mar (msnm)')
Altitud
disp('Velocidad de propagación de la llama del gas (m/s)')
v_p
disp('-----')

x_CO=prp_CO_bio/prp_CH4_bio;
e=(9.52*(1+x_air))/(1+x_CO);
CalcPropBiogas;
Dens_bio_r=Dens_bio/Dens_0;

%-----INYECTOR-----
d_0=(Cdl_bio*[3600/1]/(0.00364*Cf))^(1/2)*(Dens_bio_r/pm_i)^(1/4);
d_0_real=round(d_0);
S_0_real=pi*(d_0_real*[1/1000]/2)^2;

%-----GARGANTA-----
d_g=d_0_real*(1+(e/Dens_bio_r^(1/2)));
if d_g<12.70
    d_g_real=12.70;
else
    if d_g<19.05
        d_g_real=19.05;
    else
        if d_g<25.40
            d_g_real=25.40;
        else
            d_g_real=31.75;
        end
    end
end
S_g_real=pi*(d_g_real*[1/1000]/2)^2;

S_l=S_g_real/4;
d_l=2*(S_l/pi)^(1/2)*[1000/1];
d_l_real=round(d_l);
S_l_real=4*pi*(d_l_real*[1/1000]/2)^2;

e_real=(Dens_bio_r^(1/2))*((d_g_real/d_0_real));
Cdl_g=Cdl_bio*(1+e_real);

L_g=10*d_g_real;
L_g_real=round(L_g);

%-----CABEZAL-----

Cdl_c=Cdl_g;

if Cdl_bio<0.00025
    d_c_real=12.70;
else

```

```

    if Cdl_bio<0.00035
        d_c_real=19.05;
    else
        if Cdl_bio<0.00045
            d_c_real=25.40;
        else
            d_c_real=31.75;
        end
    end
end
S_c_real=pi*(d_c_real*[1/1000]/2)^2;

%-----PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL QUEMADOR-----
e=e_real;
CalcPropBioAir;

pm_i_real=(Dens_bio_r/d_0_real^4)*(Cdl_bio*[3600/1]/(0.00364*Cf))^2;
v_0=Cdl_bio/S_0_real;
v_g=v_0*S_0_real/S_g_real;
Ap_i=-Dens_bio*(v_0^2/(2*g))*(1-(d_0_real/d_g_real)^2);
x_air_real=((e_real*(1+x_CO))/9.52)-1;
Re_g=(4*Dens_m*Cdl_g)/(pi*VisDin_m*d_g_real*[1/1000]);
if Re_g<2000
    f=64/Re_g;
else
    f=0.316/Re_g^(1/4);
end;

Ap_g=(f/2)*Dens_m*((16*Cdl_g^2)/(pi^2*(d_g_real*[1/1000])^5))*(L_g_real*[1/1000]);
v_c=Cdl_c/S_g_real;
v_sc=Cdl_c/S_c_real;

disp('-----RESULTADOS-----')
disp('-----Dimensiones quemador-----')

disp('Diámetro del orificio del inyector (mm)')
d_0_real
disp('Diámetro de la garganta o tubo de mezcla (mm)')
d_g_real
if d_g<12.70
    disp('Tubo de 1/2 in.')
else
    if d_g<19.05
        disp('Tubo de 3/4 in.')
    else
        if d_g<25.40
            disp('Tubo de 1 in.')
        else
            disp('Tubo de 1 y 1/4 in.')
        end
    end
end

disp('Área de la garganta (m2)')
S_g_real
disp('Longitud de la garganta o tubo de mezcla (mm)')
L_g_real
disp('Diámetro de las lumbreras x4 (mm)')
d_l_real
disp('Área total de absorción (m2)')
S_l_real
disp('Diámetro del cabezal del quemador (mm)')
d_c_real
if d_c_real==12.70
    disp('Cabezal de 1/2 in.')
else
    if d_c_real==19.05
        disp('Cabezal de 3/4 in.')
    else
        if d_c_real==25.40
            disp('Cabezal de 1 in.')
        else
            disp('Cabezal de 1 y 1/4 in.')
        end
    end
end
end
end

```

```

disp('-----Parámetros de Funcionamiento-----')

disp('Presión manométrica real previa al inyector (Pa)')
pm_i_real
disp('Velocidad del gas por el orificio del inyector (m/s)')
v_0
disp('Velocidad del gas por el tubo de mezcla (m/s)')
v_g
disp('Velocidad del en el cabezal (m/s)')
v_c
disp('Velocidad a la salida del cabezal (m/s)')
v_sc
disp('Exceso de aire')
x_air_real
disp('Presión de conducción (Pa)')
Ap_i
disp('Caída de presión en la garganta (Pa)')
Ap_g
disp('-----')

```

### D.5. MATLAB. Cálculo de las propiedades del agua

Cálculo de las propiedades del agua para una temperatura de entrada dada

#### CalcPropAgua.m

```

%Cálculo de las propiedades del agua (l) para una temperatura de entrada
%T_ag en °C

%Las salidas son:
%Dens_ag:Densidad del líquido saturado en kg/m3
%Cp_ag:Calor específico del líquido saturado en J/kg.°C
%k_ag:Conductividad térmica del líquido saturado en W/m.°C
%VisDin_ag:Viscosidad dinámica del líquido saturado en kg/m.s
%Pr_ag:Numero de Prandtl

clear Dens_ag Cp_ag k_ag VisDin_ag Pr_ag

Dens_ag=-0.000000170421403*T_ag^4+0.000049489284191*T_ag^3-
0.008078024150509*T_ag^2+0.064606150668166*T_ag+999.782175795219000;
Cp_ag=0.000003172987106*T_ag^4-0.000778076452596*T_ag^3+0.075776577186614*T_ag^2-
2.960347078526390*T_ag+4217.067156032370000;
k_ag=0.000000000676628*T_ag^4-
0.000000145850301*T_ag^3+0.000000663894294*T_ag^2+0.001894019734422*T_ag+0.561144513457557;
VisDin_ag=0.00000000032509*T_ag^4-0.000000009043873*T_ag^3+0.000000981930742*T_ag^2-
0.000055168478790*T_ag+0.001779786561265;
Pr_ag=0.000000293253711*T_ag^4-0.000080817027456*T_ag^3+0.008602200834567*T_ag^2-
0.460936213178848*T_ag+13.382198757764000;

```

### D.6. MATLAB. Cálculo de las propiedades de los GPC

Calcula las propiedades de los GPC para una temperatura de entrada una proporción de metano en el biogás una proporción de aire y altitud determinada.

#### CalcPropGPC.m

```

%Cálculo de las propiedades de los gases producto de la combustión GPC para una temperatura
de entrada
%T_GCP en °C

%Las salidas son:
%Dens_ag:Densidad del líquido saturado en kg/m3
%Cp_ag:Calor específico del líquido saturado en J/kg.°C
%k_ag:Conductividad térmica del líquido saturado en W/m.°C
%VisDin_ag:Viscosidad dinámica del líquido saturado en kg/m.s
%Pr_ag:Numero de Prandtl

clear T_GPC_K
clear Dens_CO Cp_CO k_CO VisDin_CO Pr_CO
clear Dens_N Cp_N k_N VisDin_N Pr_N
clear Dens_O Cp_O k_O VisDin_O Pr_O
clear Dens_HO Cp_HO k_HO VisDin_HO Pr_HO

```

```

clear Dens_GPC Cp_GPC k_GPC VisDin_GPC Pr_GPC

T_GPC_K=T_GPC+273.15; %Pasamos la temperatura de entrada a K ya que las ecuaciones estan
calculadas para esa escala

%Dióxido de Carbono
Dens_CO=-0.000000022090909*T_GPC_K^3+0.000036948051948*T_GPC_K^2-
0.022391123376623*T_GPC_K+5.794829870129880;
Cp_CO=0.000002404040404*T_GPC_K^3-
0.003710389610390*T_GPC_K^2+2.548167388167380*T_GPC_K+365.264069264071000;
k_CO=-0.000000000020970*T_GPC_K^3+0.000000066903030*T_GPC_K^2+0.000041476017316*T_GPC_K-
0.001335852813853;
VisDin_CO=0.000000000000013*T_GPC_K^3-
0.00000000036853*T_GPC_K^2+0.000000064780707*T_GPC_K+-0.000001499164502;
Pr_CO=-0.0000000000565657*T_GPC_K^3+0.000000759307359*T_GPC_K^2-
0.000677243867244*T_GPC_K+0.922601731601731;

%Nitrógeno
Dens_N=0.000000000005746*T_GPC_K^4-0.000000019501088*T_GPC_K^3+0.000024625979021*T_GPC_K^2-
0.014243757187257*T_GPC_K+3.708375757575730;
Cp_N=-0.000000285994561*T_GPC_K^3+0.000703280885781*T_GPC_K^2-
0.333483294483295*T_GPC_K+1084.257575757580000;
k_N=0.000000000007685*T_GPC_K^3-
0.000000040758741*T_GPC_K^2+0.000097435392385*T_GPC_K+0.000369696969697;
VisDin_N=0.000000000000010*T_GPC_K^3-
0.00000000034728*T_GPC_K^2+0.000000062742754*T_GPC_K+0.000001772303030;
Pr_N=0.000000000000236*T_GPC_K^4-0.00000000981546*T_GPC_K^3+0.000001535635198*T_GPC_K^2-
0.000949741647242*T_GPC_K+0.883242424242423;

%Oxígeno
Dens_O=0.000000000137044*T_GPC_K^4-0.000000236019580*T_GPC_K^3+0.000155296177156*T_GPC_K^2-
0.048463041958043*T_GPC_K+7.117457575757620;
Cp_O=-0.000001062626263*T_GPC_K^3+0.001696709956710*T_GPC_K^2-
0.578434343434366*T_GPC_K+969.927056277059000;
k_O=0.0000000000013131*T_GPC_K^3-0.000000047095238*T_GPC_K^2+0.000106320202020*T_GPC_K-
0.001256341991342;
VisDin_O=0.000000000000057*T_GPC_K^3-0.00000000095400*T_GPC_K^2+0.00000094899832*T_GPC_K-
0.000000781031746;
Pr_O=0.000000000000140*T_GPC_K^4-0.000000001253043*T_GPC_K^3+0.000002106721057*T_GPC_K^2-
0.001177675472675*T_GPC_K+0.906328282828283;

%Agua (g)
Dens_HO=-0.000000001941725*T_GPC_K^3+0.000004717855478*T_GPC_K^2-
0.004181593240093*T_GPC_K+1.595171794871800;
Cp_HO=-0.000004602952603*T_GPC_K^3+0.009821445221446*T_GPC_K^2-
6.263714063714260*T_GPC_K+3237.524475524510000;
k_HO=0.000000013030303*T_GPC_K^2+0.000067409090909*T_GPC_K-0.003019393939394;
VisDin_HO=0.000000000000091*T_GPC_K^2+0.000000035956667*T_GPC_K-0.000000954303030;
Pr_HO=-0.000000002461538*T_GPC_K^3+0.000005366899767*T_GPC_K^2-
0.003746946386946*T_GPC_K+1.836057808857820;

%La reacccción dada es
%[x_CO*CO2+CH4]+2(1+x_air)[O2+3.76N2]---->(1+x_CO)CO2+2H2O+2x_airO2+7.52(1+x_air)N2
%La cantidad de moles totales de los productos es
%(1+x_CO)+2+2x_air+7.52(1+x_air)=10.52+x_CO+9.52x_air
%La proporción molar de cada compuesto en el gas será %CO2=M(CO2)/Mt

P_CO_GPC=(1+x_CO)/(10.52+x_CO+9.52*x_air);
P_N_GPC=(7.52*(1+x_air))/(10.52+x_CO+9.52*x_air);
P_O_GPC=(2*x_air)/(10.52+x_CO+9.52*x_air);
P_HO_GPC=2/(10.52+x_CO+9.52*x_air);

Dens_GPC_0=P_CO_GPC*Dens_CO+P_N_GPC*Dens_N+P_O_GPC*Dens_O+P_HO_GPC*Dens_HO;
Cp_GPC=P_CO_GPC*Cp_CO+P_N_GPC*Cp_N+P_O_GPC*Cp_O+P_HO_GPC*Cp_HO;
k_GPC=P_CO_GPC*k_CO+P_N_GPC*k_N+P_O_GPC*k_O+P_HO_GPC*k_HO;
VisDin_GPC=P_CO_GPC*VisDin_CO+P_N_GPC*VisDin_N+P_O_GPC*VisDin_O+P_HO_GPC*VisDin_HO;
Pr_GPC=P_CO_GPC*Pr_CO+P_N_GPC*Pr_N+P_O_GPC*Pr_O+P_HO_GPC*Pr_HO;

%Corrección de la densidad por la altitud
Dens_GPC=Dens_GPC_0*((288.15+Altitud*(-0.0065))/288.15)^-(9.81/(287*(-0.0065)));

```

### D.7. MATLAB. Cálculo de la transmisión de calor para EU

Calcula el calor transferido hacia cada elemento finito del intercambiador. Necesario para D.8.

TU\_x.m

```
%Cálculo de los parámetros térmicos del elemento unitario con Tentrada_ag y
%Tentrada_GPC

%Parámetros de entrada
%Geométricos unitarios:
%[r(i,j,k),fi(i,j,k),z(i,j,k)],L(i,j,k)
%Geométricos totales:
%D_superior,d_e,d_i,S_T
%Termicos unitarios
%T_GPC_EU(i,j,k)
%Térmicos
%Tentrada_ag
%Caudales
%Cdl_agua,Cdl_GPC,v_ag,v_GPC

%Parámetros de salida
%T2_ag(i,j,k)

%-----
T1_ag_EU=Tentrada_ag;

A_i_EU=2*pi*(d_i/2)*L(i,j,k);
A_e_EU=2*pi*(d_e/2)*L(i,j,k);
%-----Factores de corrección-----
%Factor de corrección de profundidad
if n<=4
    FC_profundidad=0.06*n+0.6533;
else
    if n<=8
        FC_profundidad=0.0164*n+0.8393;
    else
        if n>=20
            FC_profundidad=1;
        else
            FC_profundidad=0.0017*n+0.9633;
        end
    end
end

%Factor de corrección experimental de h_i
FC_exp_i=1;

T_ag=T1_ag_EU;
T_GPC=T_GPC_EU(i,j,k);
CalcPropAgua;
CalcPropGPC;

%-----zona convectiva-----
%Coeficiente global de transferencia de calor
%Resistencia a la conducción
R_cond=log(d_e/d_i)/(2*pi*k_tubo*L(i,j,k));
%Resistencia a la convección (externa)
v_GPC_max=v_GPC*(S_T/(S_T-d_e));
Re_GPC_max=(v_GPC_max*Dens_GPC*d_e)/VisDin_GPC;
Nu_GPC=0.8*Re_GPC_max^0.4*Pr_GPC^0.36;
h_e_EU=FC_profundidad*(k_GPC*Nu_GPC)/d_e;
R_conv_e=1/(h_e_EU*A_e_EU);
%Resistencia a la convección (interna)
ratio_curvatura=d_i/(2*r(i,j,k));
Re_ag=(v_ag*Dens_ag*d_i)/VisDin_ag;
Nu_ag_lineal=0.023*Re_ag^0.8*Pr_ag^0.4;
Nu_ag_curva=Nu_ag_lineal*(1+3.4*ratio_curvatura);
h_i_EU=FC_exp_i*(k_ag*Nu_ag_curva)/d_i;
R_conv_i=1/(h_i_EU*A_i_EU);
R_total=R_cond+R_conv_e+R_conv_i;

Q_conv_EU=(T_GPC_EU(i,j,k)-T1_ag_EU)/R_total;

%-----zona radiante-----
```

```

h_gr=0.0351*Tinicial_GPC-4.9234;

if i==1
    Q_rad_EU=0.75*A_e_EU*h_gr*E_tubo*(Tinicial_GPC-T1_ag_EU);
else
    if i==2
        Q_rad_EU=0.25*A_e_EU*h_gr*E_tubo*(Tinicial_GPC-T1_ag_EU);
    else
        Q_rad_EU=0;
    end
end
%-----

%Calor total intercambiado y temperatura de salida del agua
Q_EU=Q_conv_EU+Q_rad_EU;
T2_ag_EU=T1_ag_EU+Q_EU/(Dens_ag*Cp_ag*Cdl_ag);

%Temperaturas medias superficiales del tubo
Ts_i_EU=Q_EU*R_conv_i+T1_ag_EU;

```

## D.8. MATLAB. Cálculo del intercambiador

Modelo del intercambiador. Para implementarlo es necesario cargar los ficheros de D.5, D.6 y D.7.

### Intercambiador\_x.m

```

%Cálculo intercambiador helicoidal concentrico
%Todas las unidades en SI, excepto temperaturas en°C
clc

disp('-----Límites dimensionales máximos-----');
D_superior=0.2;
disp('D_superior=200mm');
D_inferior=0.05;
disp('D_inferior=50mm');
a_q=0.1;
disp('a_q=100mm');
disp('-----');

disp('-----Variables-----');
%-----Geometria-----
DireccionFlujo=3 %1.A favor de corriente, 2.Contracorriente, 3.Mixto
d_i=6/1000 %diámetro interno del tubo (m)
d_e=7/1000 %diámetro externo del tubo (m)

l=8 %Si Tipo=1,2,3, l=n° bobinados concentricos.
n=3 %Si Tipo=1,2,3, n=n° espiras por bobina.
m=500 %n° elementos diferenciales por espira

D_max=200/1000 % Diámetro de la bobina más externa (m)
if D_max>D_superior
    disp('D_max es incorrecto');
end

S_T=10.5/1000 %Separación transversal entre tubos (bobinas concéntricas) (m)
if S_T<3*d_e/2
    disp('S_T es incorrecto');
end

S_L=10.5/1000
if S_L<3*d_e/2 %Separación longitudinal entre tubos (espiras contiguas) (m)
    disp('S_L es incorrecto');
end

D_min=D_max-2*((l-1)*S_T);
a_i=n*S_L;
a_t=a_q+a_i;
if (D_min<D_inferior)
    disp('El diámetro mínimo del intercambiador propuesto excede los límites dimensionales!');
end
%-----Material-----
k_tubo=385 %Conductividad térmica del material utilizado (W/m°C)
E_tubo=0.78 %Emisividad del material utilizado

```

```

%-----Fluido interno(agua)-----
Cdl_ag=2/60000 %Caudal de agua (m3/s)
Tinicial_ag=15 %Temperatura inicial del agua (°C)

%-----Fluido externo(GPC)-----
prp_CO_bio=40/100 %Proporción de dióxido de carbono en el biogás
prp_CH4_bio=60/100 %Proporción de metano en el biogás
x_air=0.4 %Exceso de aire en la combustión (es preciso calcularlo por Quemador_x.m
(x_air_real)
Cdl_biogas=0.00025 %Caudal de biogás (m3/s)
Tinicial_GPC=775; %;NO VARIAR! Ajustado experimentalmente

%-----Externos-----
Altitud=2500 %Altitud sobre el nivel del mar (msnm)
FC_carcasa=1; %Si la carcasa se ajusta bien al serpentín toma valor 1

disp('-----');

%-----Fluido interno(agua)-----
v_ag=Cdl_ag/((pi*d_i^2)/4);

%-----Fluido externo(GPC)-----
x_CO=prp_CO_bio/prp_CH4_bio;
x_GPC=(10.52+x_CO+9.52*x_air)/(1+x_CO);
Cdl_GPC=FC_carcasa*x_GPC*Cdl_biogas;
v_GPC=Cdl_GPC/((pi*D_superior^2)/4);

T1_ag=zeros(n,m,1);
T2_ag=zeros(n,m,1);
h_e=zeros(n,m,1);
Q_conv=zeros(n,m,1);
Q_rad=zeros(n,m,1);
Q=zeros(n,m,1);
Ts_i=zeros(n,m,1);
Conv_i=zeros(n,m,1);
Conv_e=zeros(n,m,1);

%-----Geometría del problema-----
%Cálculo de los parámetros de posición y geométricos del elemento unitario

%Parámetros de entrada
%Tipo
%n,m,l
%S_T,S_L,D_max,d_e
%i,j,k

%parámetros de salida
%z(i,j,k)
%fi(i,j,k)
%r(i,j,k)
%A_T(i,j,k)
%A_L(i,j,k)
%L(i,j,k)

clear i1 i j k X Y Z r fi z x y L A_T A_L

i1=1;
X=zeros(n*m*1,1);
Y=zeros(n*m*1,1);
Z=zeros(n*m*1,1);
r_i=zeros(1,1);

for k=1:l
    for i=1:n
        for j=1:m

            %---posición---
            r(i,j,k)=(D_max/2)-((k-1)*S_T);
            fi(i,j,k)=(j-1)*(2*pi)/m;
            z(i,j,k)=((i-1)*S_L)+((S_L*(j-1))/m);

            x(i,j,k)=r(i,j,k)*cos(fi(i,j,k));
            y(i,j,k)=r(i,j,k)*sin(fi(i,j,k));

```



```

        X(i1)=x(i,j,k);
        Y(i1)=y(i,j,k);
        Z(i1)=z(i,j,k);

        i1=i1+1;

        %---Geometria---
        L(i,j,k)=r(i,j,k)*((2*pi)/m);
    end
    end
    r_i(k)=r(1,1,k);
end
%-----

%-----Temperatura de los GPC-----
%Cálculo de la temperatura de los gases T_GPC_EU(i,j,k) para cada elemento
%unitario en función de la altura z(i,j,k) del Elemento Unitario
%Temperaturas medias para el cálculo de propiedades
T_GPC=300;
CalcPropGPC;
T_ag=25;
CalcPropAgua;

%Cálculo de la constante de proporcionalidad para superficie de intercambio en función de
la altura
%A_intercambio=b*z y Capacidades caloríficas

R=0;
for k=1:l
    R=R+r(1,1,k);
end
b=(2*pi^2*d_e*R)/S_L;
CC_ag=Dens_ag*Cp_ag*Cdl_ag*l;
CC_GPC=Dens_GPC*Cp_GPC*Cdl_GPC;
CC_rel=CC_GPC/CC_ag;

%Coeficiente de convección(externa)
v_GPC_max=v_GPC*(S_T/(S_T-d_e));
Re_GPC_max=(v_GPC_max*Dens_GPC*d_e)/VisDin_GPC;
Nu_GPC=0.8*Re_GPC_max^0.4*Pr_GPC^0.36;
%Factor de corrección de profundidad
if n<=4
    FC_profundidad=0.06*n+0.6533;
else
    if n<=8
        FC_profundidad=0.0164*n+0.8393;
    else
        if n>=20
            FC_profundidad=1;
        else
            FC_profundidad=0.0017*n+0.9633;
        end
    end
end
h_e=FC_profundidad*(k_GPC*Nu_GPC)/d_e;

%Cálculo temperatura GPC método Efectividad-NTU flujo paralelo
kl=1;
Temperaturas_GPC=zeros(n*m*1,1);
T_GPC_EU=zeros(n,m,1);
for k=1:l
    for i=1:n
        for j=1:m
            T_GPC_EU(i,j,k)=Tinicial_GPC-(Tinicial_GPC-Tinicial_ag)*((1-exp(-
            ((h_e*b/CC_GPC)*(1-CC_rel)*z(i,j,k)))/(1+CC_rel)));
            Temperaturas_GPC(kl)=T_GPC_EU(i,j,k);
            kl=kl+1;
        end
    end
end
end
%-----

%Variables para representación gráfica
Temperaturas=zeros(n*m*1,1);

```

```

CalorConvectivo=zeros(n*m*1,1);
CalorRadiante=zeros(n*m*1,1);
CalorTotal=zeros(n*m*1,1);
Conveccion_e=zeros(n*m*1,1);
Conveccion_i=zeros(n*m*1,1);

Distancia=zeros(n*m*1,1);
Longitud=0;

Tentrada_ag=Tinicial_ag;
if DireccionFlujo==1
    disp('-----Helicoidal a favor de corriente-----');
    for k=1:l
        j1=(n*m*(k-1))+1;
        for i=1:n
            for j=1:m
                %-----Cálculo de parámetros para EU-----
                TU_x;
                %-----Matrices de datos-----
                T1_ag(i,j,k)=T1_ag_EU;
                T2_ag(i,j,k)=T2_ag_EU;
                h_e(i,j,k)=h_e_EU;
                Q_conv(i,j,k)=Q_conv_EU;
                Q_rad(i,j,k)=Q_rad_EU;
                Q(i,j,k)=Q_EU;
                Ts_i(i,j,k)=Ts_i_EU;
                Conv_i(i,j,k)=h_i_EU;
                Conv_e(i,j,k)=h_e_EU;
                %---Vectores de datos para representación gráfica---
                Temperaturas(j1)=T2_ag(i,j,k);
                CalorConvectivo(j1)=Q_conv(i,j,k);
                CalorRadiante(j1)=Q_rad(i,j,k);
                CalorTotal(j1)=Q(i,j,k);
                Conveccion_e(j1)=Conv_e(i,j,k);
                Conveccion_i(j1)=Conv_i(i,j,k);

                Longitud=Longitud+L(i,j,k);
                Distancia(j1)=Longitud;

                Tentrada_ag=T2_ag(i,j,k);
                j1=j1+1;
            end
        end
    end
end

if DireccionFlujo==2
    disp('-----Helicoidal a contracorriente-----');

    for k=1:l
        j1=n*m*k;
        for i_m=0:n-1
            i=n-i_m;
            for j_m=0:m-1
                j=m-j_m;
                %-----Cálculo de parámetros para EU-----
                TU_x;
                %-----Matrices de datos-----
                T1_ag(i,j,k)=T1_ag_EU;
                T2_ag(i,j,k)=T2_ag_EU;
                Q_conv(i,j,k)=Q_conv_EU;
                Q_rad(i,j,k)=Q_rad_EU;
                Q(i,j,k)=Q_EU;
                Ts_i(i,j,k)=Ts_i_EU;
                Conv_i(i,j,k)=h_i_EU;
                Conv_e(i,j,k)=h_e_EU;
                %---Vectores de datos para representación gráfica---
                Temperaturas(j1)=T2_ag(i,j,k);
                CalorConvectivo(j1)=Q_conv(i,j,k);
                CalorRadiante(j1)=Q_rad(i,j,k);
                CalorTotal(j1)=Q(i,j,k);
                Conveccion_e(j1)=Conv_e(i,j,k);
                Conveccion_i(j1)=Conv_i(i,j,k);

                Longitud=Longitud+L(i,j,k);
                Distancia(j1)=Longitud;
            end
        end
    end
end

```

```

        Tentrada_ag=T2_ag(i,j,k);
        j1=j1-1;
    end
end
end

if DireccionFlujo==3
    disp('-----Helicoidal mixto-----');

    for k=1:l
        if rem(k,2)==1
            j1=n*m*k;
            for i_m=0:n-1
                i=n-i_m;
                for j_m=0:m-1
                    j=m-j_m;

                    %-----Cálculo de parámetros para EU-----
                    TU_x;
                    %-----Matrices de datos-----
                    T1_ag(i,j,k)=T1_ag_EU;
                    T2_ag(i,j,k)=T2_ag_EU;
                    Q_conv(i,j,k)=Q_conv_EU;
                    Q_rad(i,j,k)=Q_rad_EU;
                    Q(i,j,k)=Q_EU;
                    Ts_i(i,j,k)=Ts_i_EU;
                    Conv_i(i,j,k)=h_i_EU;
                    Conv_e(i,j,k)=h_e_EU;
                    %---Vectores de datos para representación gráfica---
                    Temperaturas(j1)=T2_ag(i,j,k);
                    CalorConvectivo(j1)=Q_conv(i,j,k);
                    CalorRadiante(j1)=Q_rad(i,j,k);
                    CalorTotal(j1)=Q(i,j,k);
                    Conveccion_e(j1)=Conv_e(i,j,k);
                    Conveccion_i(j1)=Conv_i(i,j,k);

                    Longitud=Longitud+L(i,j,k);
                    Distancia(j1)=Longitud;

                    Tentrada_ag=T2_ag(i,j,k);
                    j1=j1-1;
                end
            end
        else
            j1=(n*m*(k-1))+1;
            for i=1:n
                for j=1:m
                    %-----Cálculo de parámetros para EU-----
                    TU_x;
                    %-----Matrices de datos-----
                    T1_ag(i,j,k)=T1_ag_EU;
                    T2_ag(i,j,k)=T2_ag_EU;
                    h_e(i,j,k)=h_e_EU;
                    Q_conv(i,j,k)=Q_conv_EU;
                    Q_rad(i,j,k)=Q_rad_EU;
                    Q(i,j,k)=Q_EU;
                    Ts_i(i,j,k)=Ts_i_EU;
                    Conv_i(i,j,k)=h_i_EU;
                    Conv_e(i,j,k)=h_e_EU;
                    %---Vectores de datos para representación gráfica---
                    Temperaturas(j1)=T2_ag(i,j,k);
                    CalorConvectivo(j1)=Q_conv(i,j,k);
                    CalorRadiante(j1)=Q_rad(i,j,k);
                    CalorTotal(j1)=Q(i,j,k);
                    Conveccion_e(j1)=Conv_e(i,j,k);
                    Conveccion_i(j1)=Conv_i(i,j,k);

                    Longitud=Longitud+L(i,j,k);
                    Distancia(j1)=Longitud;

                    Tentrada_ag=T2_ag(i,j,k);
                    j1=j1+1;
                end
            end
        end
    end
end
end
end

```

```
%Resultados
Longitud
D_max
D_min
a_i
r_i
T2_ag_EU
plot(sort(Distancia),sort(Temperaturas))

%PARA REPRESENTACIÓN EN 3D
%scatter3(X,Y,Z,100,'Variable para representación gráfica (Line 93)','o')
```

---

## Bibliografía

---

- [1] W. Canedo, "Diagnóstico del sector energético en el área rural de Bolivia", Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas, Octubre 2007
- [2] European Comision,, "Country Strategy Paper 2007-2013" Bolivia 2007
- [3] Miguel Fernández F., "Rol e impacto socioeconómico de las Energías Renovables en el área rural de Bolivia", La Paz: CEDLA, octubre 2010
- [4] Franklin Molina Ortiz, Elvia Villena Romero, "BALANCE ENERGÉTICO NACIONAL", La Paz-Bolivia 2000
- [5] Jaime Martí Herrero, "Biodigestores Familiares. Guía de diseño y manual de instalación", GTZ-Energía. Bolivia. 2008
- [6] A.L. Miranda Barreras, R. Oliver Pujol, "Biblioteca del instalador de gas. Instalaciones y equipos", Ceac 1996
- [7] Pedro J. Pozo, "Documentos Técnicos de instalación en la Edificación DTIE", Instituto Eduardo Torroja, Madrid 1998
- [8] John H. Lienhard, "A Heat Transfer Textbook", Phlogiston Press, Cambridge Massachusetts 2008
- [9] J. Holman, "Heat Transfer 10th. Ed", McGraw-Hill, 2010
- [10] Louis Theodore, "Heat Transfer Applications for the Practicing Engineer", Wiley
- [11] Michael J. Moran, Howard N. Shapiro, "Fundamentals of Engineering Thermodynamics 5th Ed.", Wiley 2006
- [12] Ramesh K. Shah, Dusan P. Seculic, "Fundaments of Heat Exchanger Design", John Wiley & Sons, Inc. 2003
- [13] Sadik KakaÇ, Hongtan Liu, "Heat Exchangers. Selection, rating and thermal design 2th. Ed.", CRC PRESS 2002
- [14] W. Trinks,M. H. Mawhinney, R. A. Shannon, R. J. Reed " Industrial Furnaces 6th Ed." John Wiley & Sons, Inc 2004
- [15] Yunus A. Çengel, Michael A. Boles, "Termodinámica 6th Ed.", McGraw Hill 2006
- [16] Irvin Glassman, Richard A. Yetter, "Combustion 4th. Ed.", Elsevier 2008
- [17] B.A. Younglove, J.F. Ely , "Thermophysical Properties of Fluids II, Methane, Ethane, Propane Isobutane and Normal Butane", National Engineering Laboratory, Colorado 1987
- [18] David Fulford, "Biogás Stove Design. A short course", 1996
- [19] Martina, P., Aeberhard, R., Corace, J., García Solá, E., Bucki Wasserman B., "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALORÍMETRO DE JUNKERS PARA DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DEL BIOGÁS", ASADES 2011
- [20] Ivet Ferrer, Marianna Garfi, Enrica Uggetti, Laia Ferrer-Martí, Arcadio Calderon, Enric Velo, "Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes", Elsevier 2011
- [21] Ing. E. Brizuela, Ing. E. Brizuela, "Combustion"





# DISEÑO Y CÁLCULO DE UN SISTEMA DOMÉSTICO DE PRODUCCIÓN DE ACS A PARTIR DE BIOGÁS Y ECONÓMICAMENTE VIABLE PARA EL ÁREA RURAL BOLIVIANA

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA (UPNA)

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

TITULACIÓN: Ingeniería Industrial

ALUMNO: Óscar Paz Sagüés

# Preámbulo

- Marco institucional
  - Programa de Formación Solidaria, UPNA
  - CINER y Universidad Mayor de San Simón en Cochabamba (Bolivia)
  - Jaime Martí Herrero, Dr. Investigador del CIMNE
- Objetivos del PFC
  - Objetivo principal: Sistema de producción de ACS con biogás y requerimientos mínimos (caudal, temperatura, consumo y precio)
  - Objetivos específicos: Análisis de los mecanismos de transmisión de calor y sistemas de ACS. Establecer un método para la construcción de un calentador de biogás.



# ¿Por qué biogás?

- País poco poblado (Apenas 6 hab./km<sup>2</sup>)
  - 20% vive en núcleos rurales
  - Gran dispersión, entorno geográfico difícil y poca población
  - Sólo el 57% de la población rural tiene acceso a la electricidad
- Sistema Interconectado Nacional (SIN)
  - Baja rentabilidad en la electrificación rural
  - Solución: Mini-redes eléctricas aisladas. GLI
    - Limitado a los núcleos urbanos más grandes y sol
- Biogás. La alternativa
  - Coste inicial muy bajo en relación con sus c
  - Trata los desechos de las actividades agríc
  - Sustituye la biomasa tradicional: Deforestac
  - Producción simultánea de fertilizante: el bic
  - GTZ en la década de los 90 y la ONG “Tecno partir de 2001.

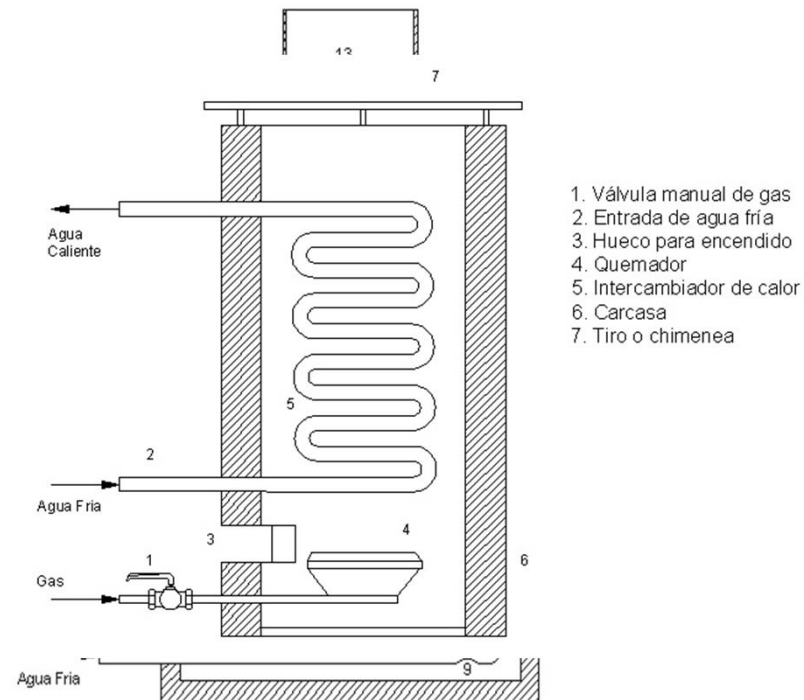


# ¿ Por qué un sistema de producción de ACS?

- Se plantea la higiene como una necesidad insatisfecha en el área rural de Bolivia
- La higiene personal es fundamental:
  - Proliferación de organismos nocivos para el ser humano, como piojos o bacterias
  - Favorece la aparición de enfermedades cutáneas y bucales
  - Riesgo de exclusión social
- Bajas temperaturas del agua en comunidades del Altiplano los Valles Subandinos

# Elección del sistema de producción de ACS

- Sistemas de producción de ACS: Individuales/centralizados, Combustión/Eléctrico/Solar, Instantáneo/Acumulación...
- Elección:
  - Criterio: Coste, simplicidad, durabilidad, acceso de energía y potencia
  - Individual, a gas e instantáneo
- Funcionamiento general
  - Elementos de encendido
- Funcionamiento simplificado
  - Tres elementos:
    - Quemador
    - Intercambiador
    - Carcasa



# El quemador

- Es el dispositivo que regula la mezcla aire combustible

p

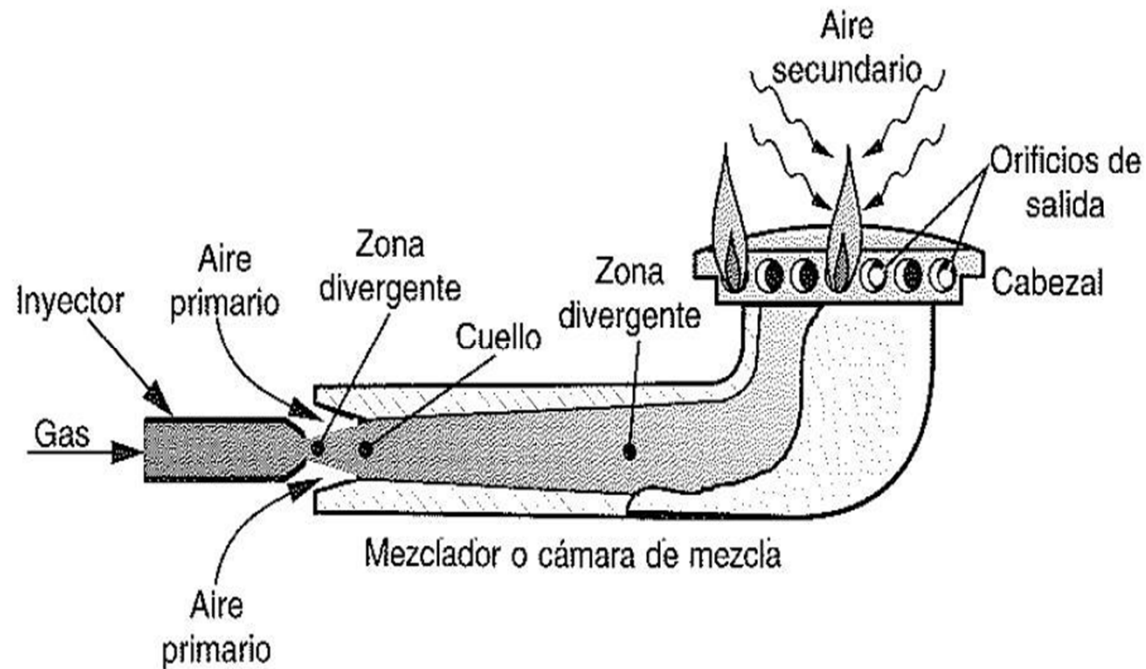
- D

•

•

•

•



- Elección: quemador atmosférico de llama azul o premezcla

# El intercambiador

- Es aquel dispositivo utilizado para transferir energía térmica entre los

- T. Caliente
- T. Caliente
- T. Caliente interna. co



- Objetivos para maximizar la transferencia de calor:

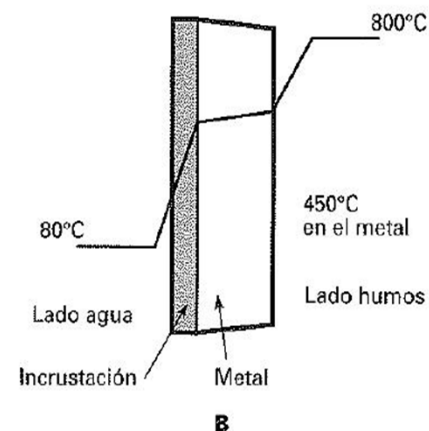
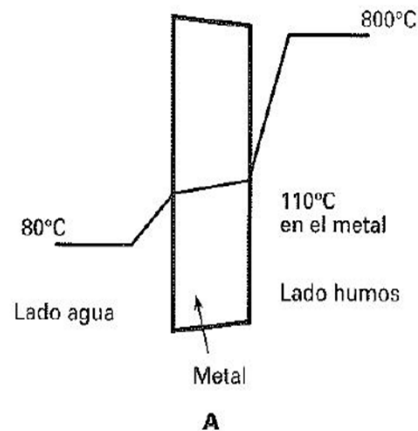
- Mejorar la transferencia de calor por conducción
- Maximizar el área expuesta a la llama

- M
- M

- Exis

- Elec

- E



externo

ajo coste:

# La carcasa

- Es el dispositivo encargado de:

- Re
- Mi
- Ca

Valores tipo de coeficientes de conducción (W/m<sup>2</sup>C)

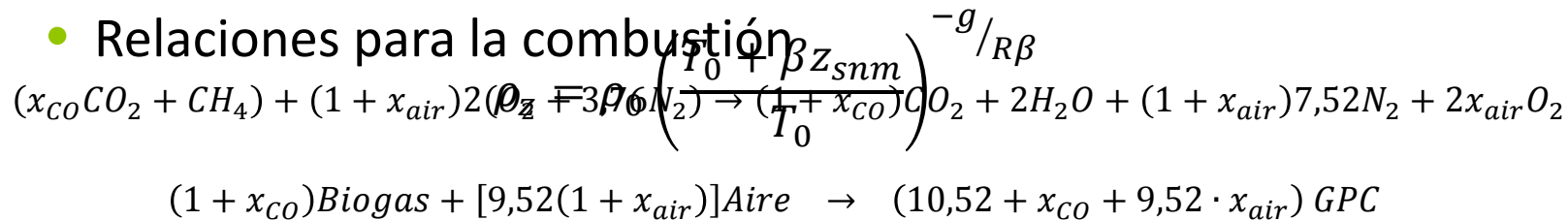
Corcho	0,039	Lana de oveja	0,043
Algodón	0,04	Madera contrachapada	0,12
Cáscara de trigo	0,06	Espuma de poliuretano	0,023
Lino	0,04-0,05	Ladrillo común	0,72
Virutas de madera	0,045	Ladrillo de arcilla refractaria	0,41-1,34
Paja	0,045-0,13	Arcilla	0,79
Hierba	0,04	Cemento	0,72-1,40

- Criterios de diseño:
  - Maximizar caudal de paso de los GPC a través del intercambiador
  - Permitir el encendido del quemador desde el exterior
  - Minimizar las pérdidas de calor al exterior:
    - Aumentando el espesor de la pared.
    - Disminuyendo la superficie de exposición (calentador lo más compacto posible)
    - Utilizando materiales de baja conductividad térmica (aislantes)

# Modelado

- Obtenemos ciertos parámetros de funcionamiento en función de diversas variables: caudal de biogás o el de agua, su temperatura, la altitud, etc.

- Fluidos: Agua y gases involucrados en la combustión



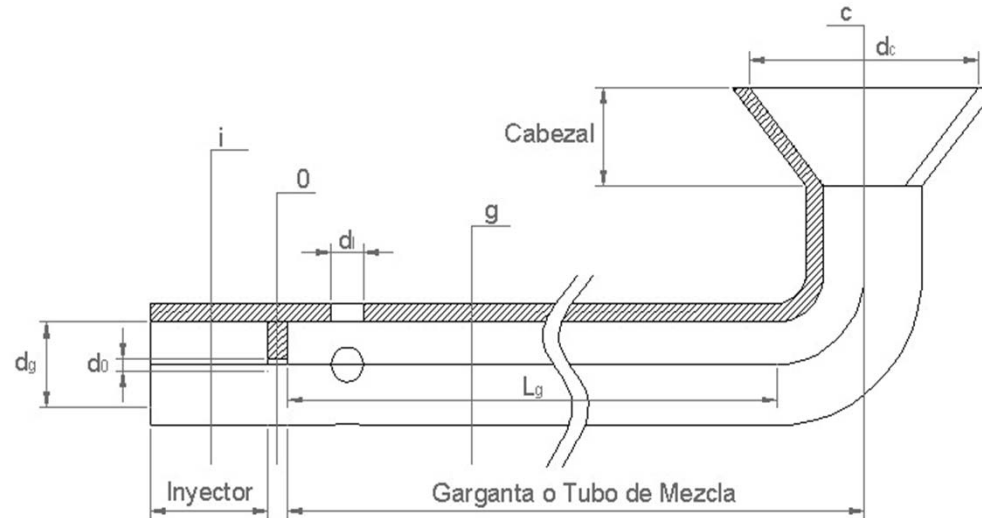
- Proporciones entre los diferentes mezclas de gases o entre los gases de cada mezcla

$$P_{mezcla} = P_{sustancia 1} + \dots + P_{sustancia n}$$

- Valoración de las propiedades de cada sustancia involucrada:
  - Cálculo de la propiedad en función de la temperatura
  - Corrección de la densidad
  - Cálculo de las propiedades de una mezcla

# Modelado del quemador

- P. entrada
  - Comp. Biogás
  - Temperaturas
  - Altitud
  - Caudal de biogás



- Fluidos involucrados son: aire, biogás, y mezcla aire+biogás
- Se calculan primero las dimensiones reales de los elementos
- Parámetros de funcionamiento: depresión, pérdida de carga, etc.
- Queda pendiente el cálculo de cabezal

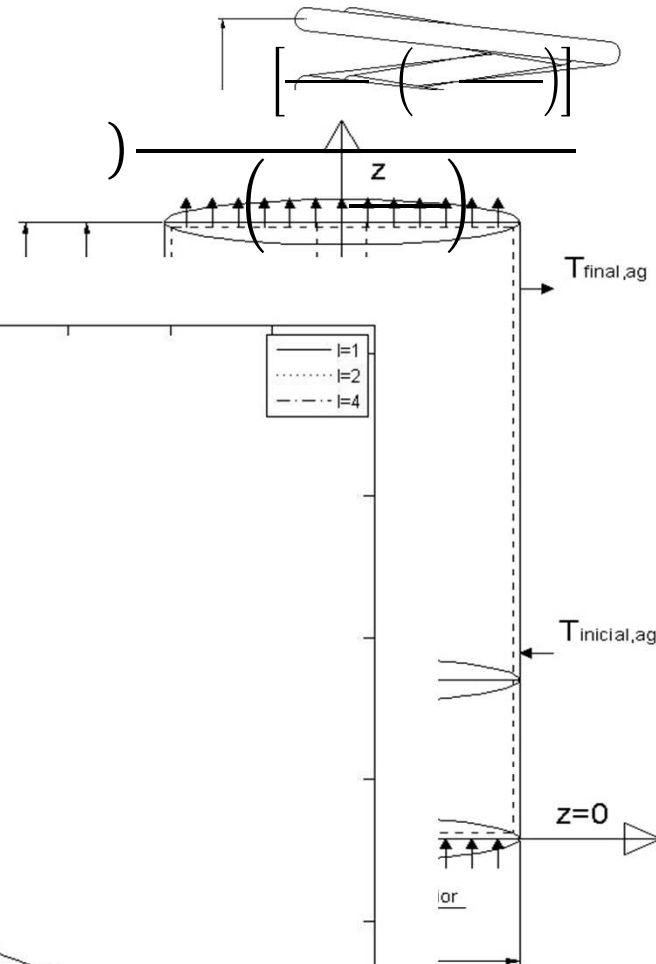
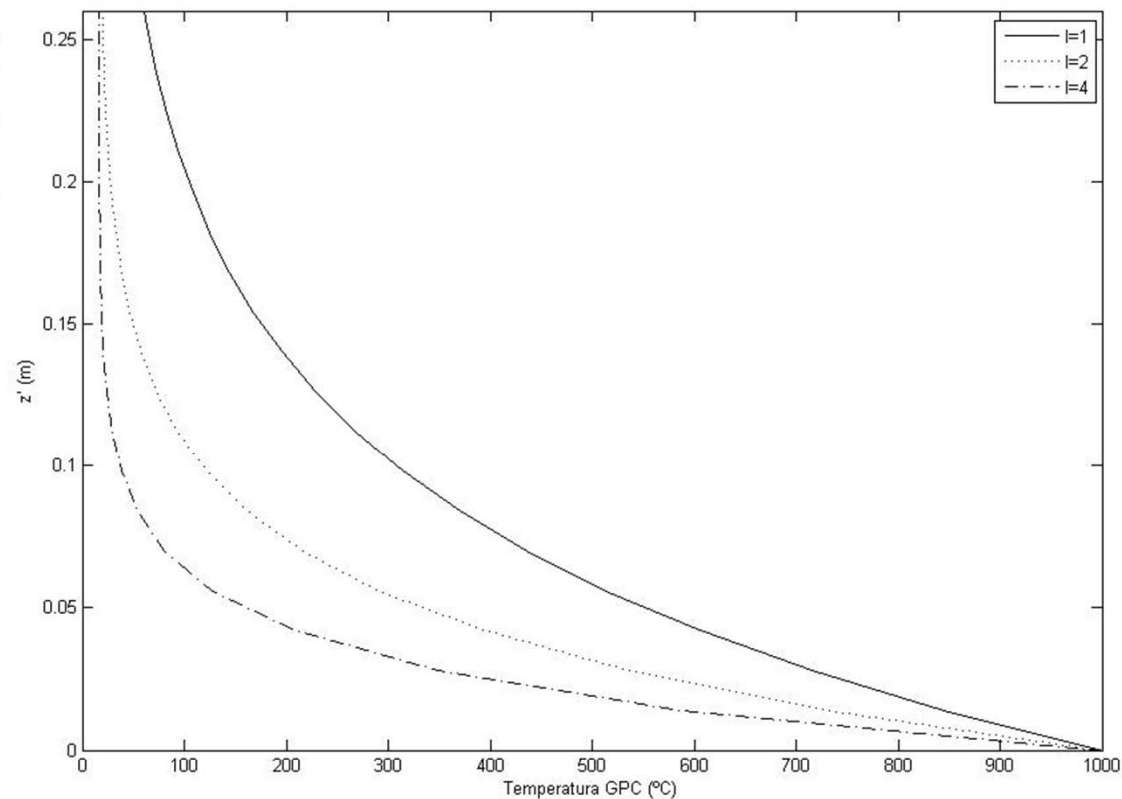


# Modelado del intercambiador

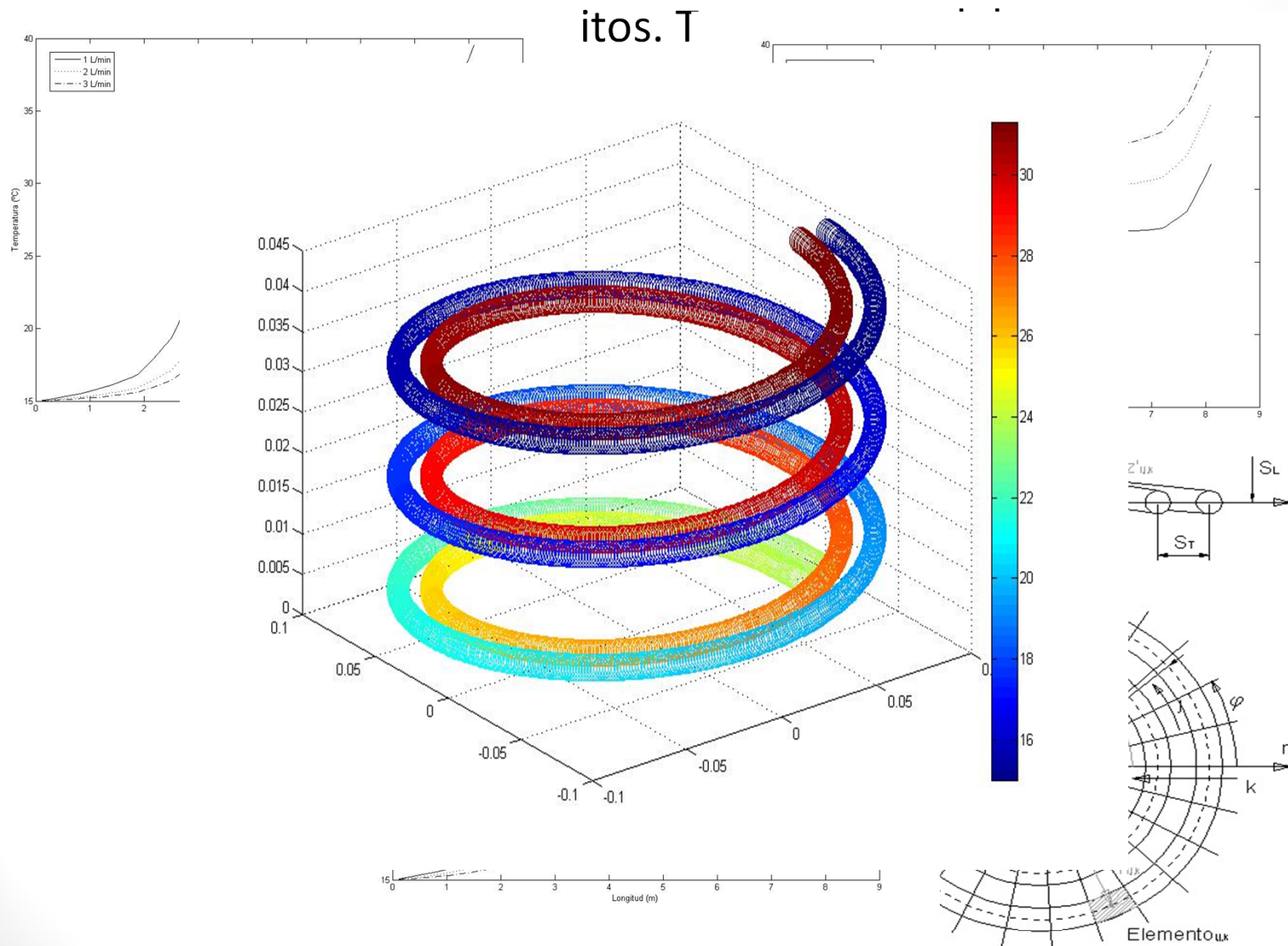
- Se supone una cámara cilíndrica
- Intercambiador: bobinados concéntricos
- Fluidos involucrados: agua y GPC

## • Méto

- I. si
- Ter
- Ter

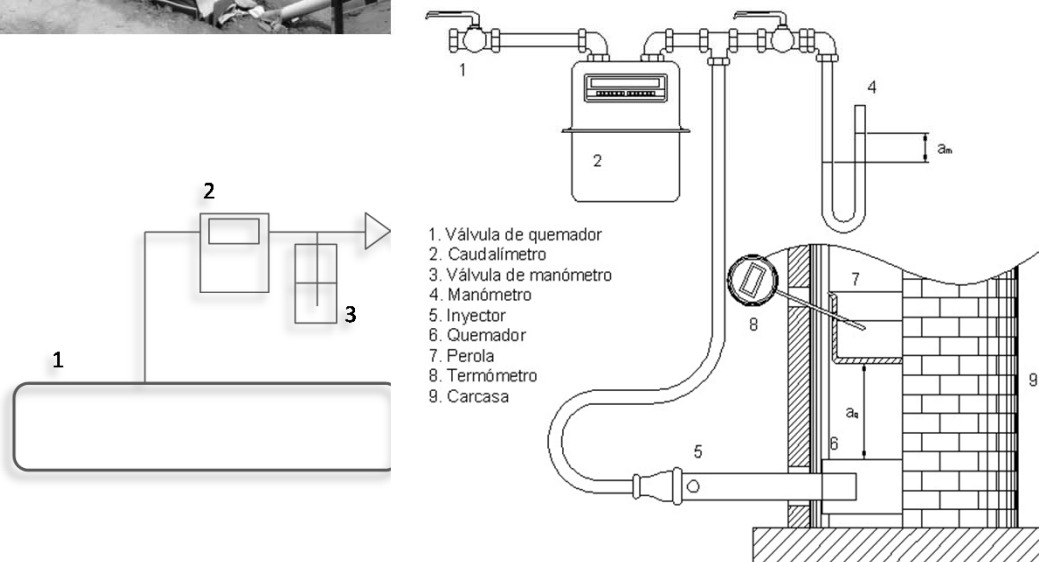


# Modelado del intercambiador



# Pruebas experimentales

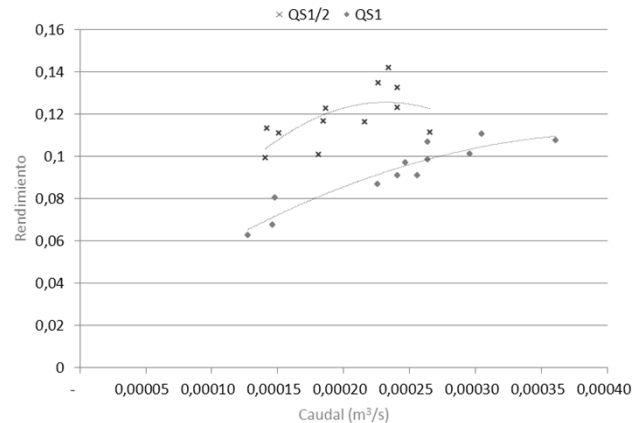
- Fueron realizadas en el Matadero Municipal de Cochabamba
- Objetivo de las 3 primeras pruebas.
  - Medir un rendimiento de transmisión de calor



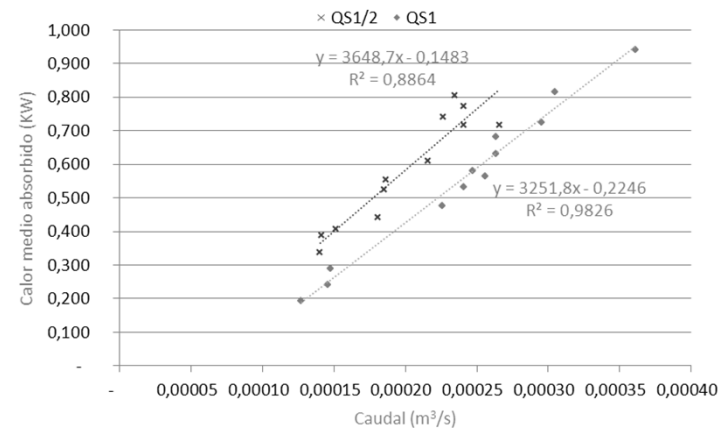
1. Biodigestor
2. Caudalímetro del biodigestor
3. Controlador de presión
4. Válvula del biodigestor
5. Depósito
6. Válvula de depósito
7. Válvula de quemador
8. Caudalímetro del quemador
9. Válvula de manómetro
10. Manómetro
11. Quemador

# Pruebas experimentales

## • Pruebas



á



## • Resultados

- Cabezal de media pulgada más eficiente para los caudales probados

- Incapaz de suministrar el caudal necesario a pesar de aumentar la presión

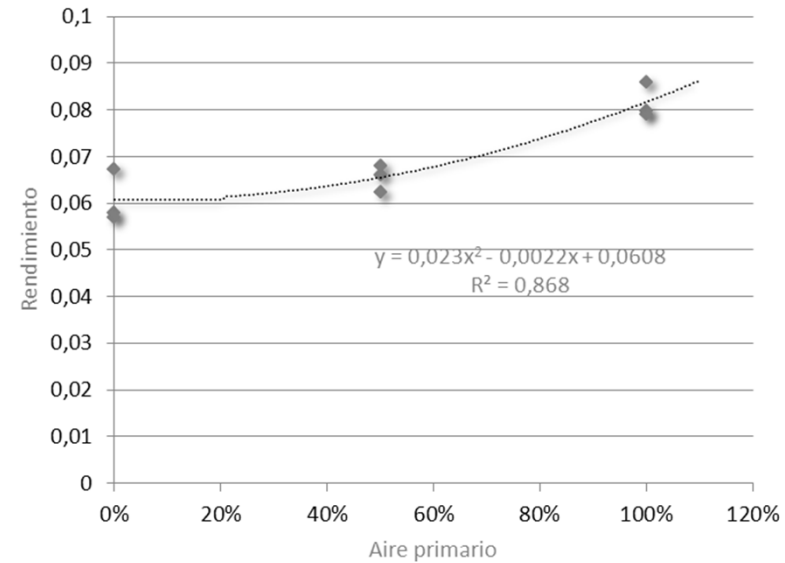
## • Regla:

- Para caudales de biogás inferiores a 0,00025 m³/s, se utilizará el cabezal de ½'.
- Para caudales comprendidos entre 0,00025 m³/s y 0,00035 m³/s se utilizará el cabezal de ¾'.
- Para caudales de biogás superiores a 0,00035 m³/s se utilizará el cabezal de 1'.



# Pruebas experimentales

- Prueba II. Aire primario



- Resultados

- El m...
- med...
- El dia...
- ning...

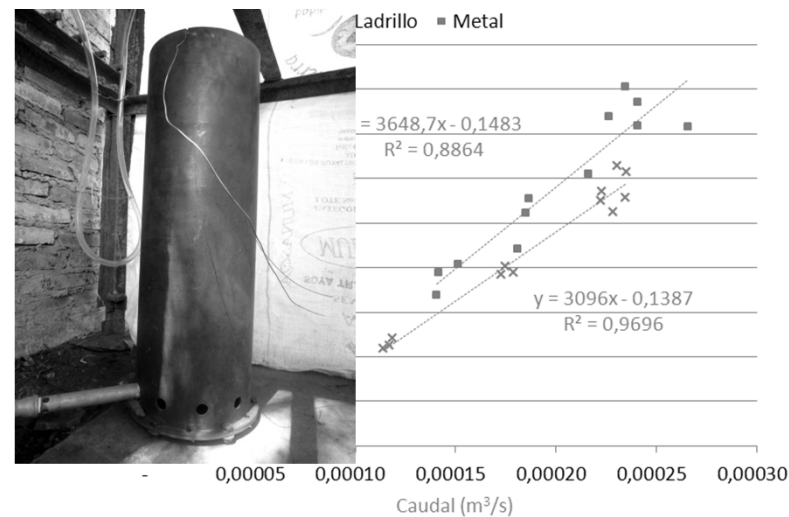
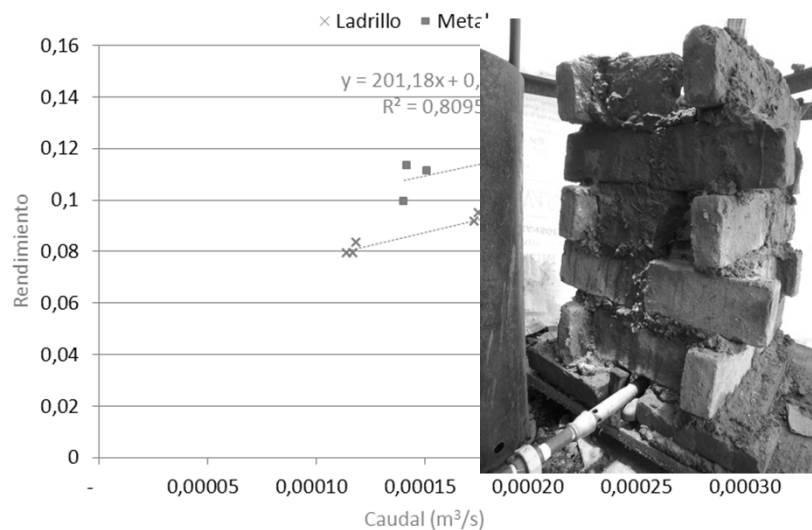


yendo a  
hace falta



# Pruebas experimentales

- Prueba III: Caracterización de la carcasa de ladrillo
  - Objetivo: relacionar el rendimiento de la carcasa económica de ladrillo con la carcasa de pruebas
  - Resultados:
    - El rendimiento de la carcasa de ladrillo es en torno a un 80% del de la carcasa de pruebas
    - La carcasa de ladrillo no se ajusta bien al sistema a calentar
    - Conclusión: fundamental que la carcasa se ajuste al serpentín



# Pruebas experimentales

## ● Prueba IV

- Objetivo: serpent
- Procedi
- Resulta

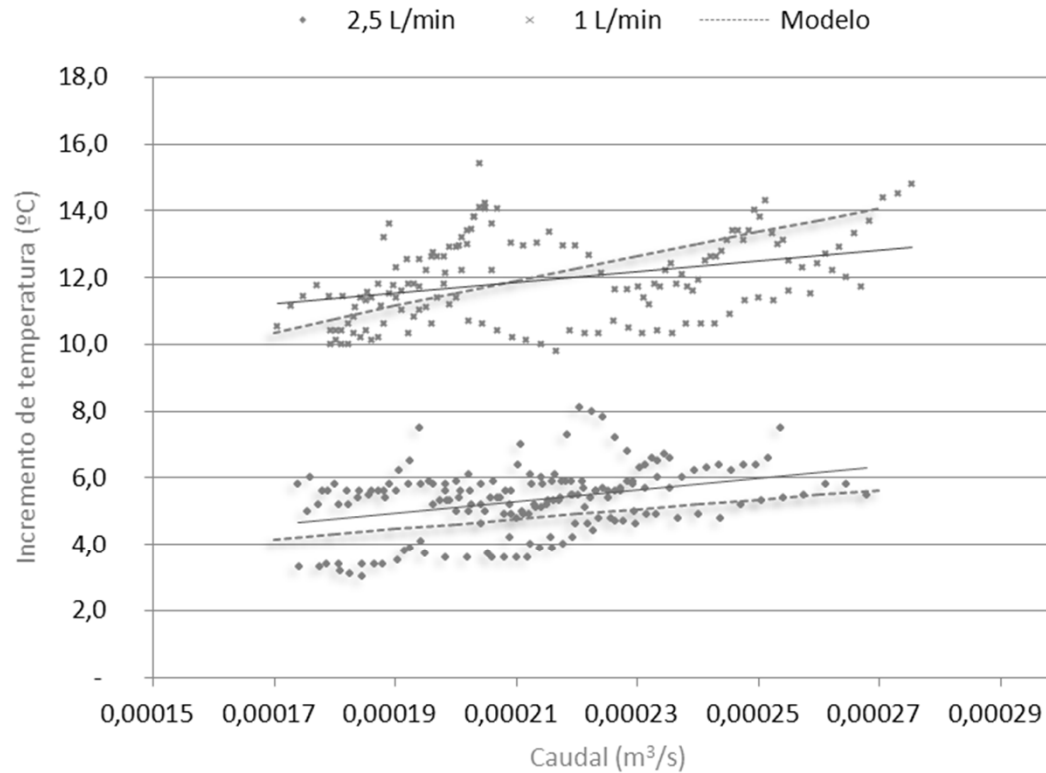
● El in

● C

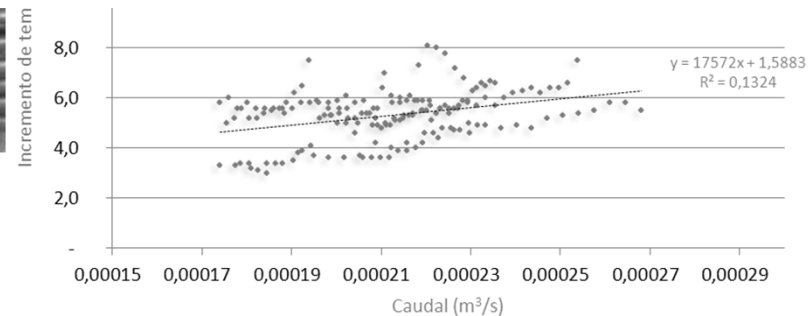
● C

● P

● C



smas

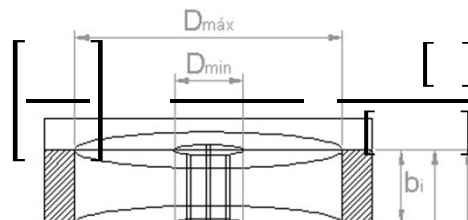


tados se

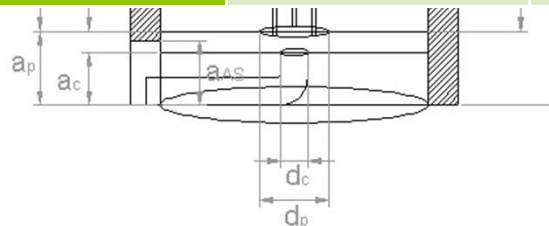
# Ejemplo de calentador

- Dos escenarios

	E1. Altipano	E2. Región subandina
Altitud, [ ]	3600	2500
Temperatura del aire, [ ]	10	25
Temperatura del agua, [ ]	15	19
Biogás diario disponible, [ ]	500	600
Temperatura del biogás, [ ]	10	25
Composición del biogás	55	60
Requerimientos energéticos, [ ]	20	40



	E1. Altipano	E2. Región subandina
Caudal de biogás, [ ]	0,00042	0,00025





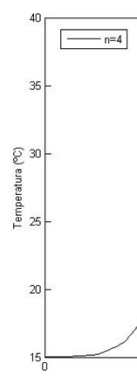
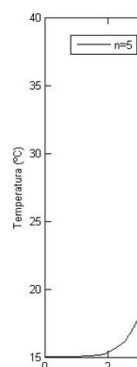
# Ejemplo de calentador

## Escenario 2

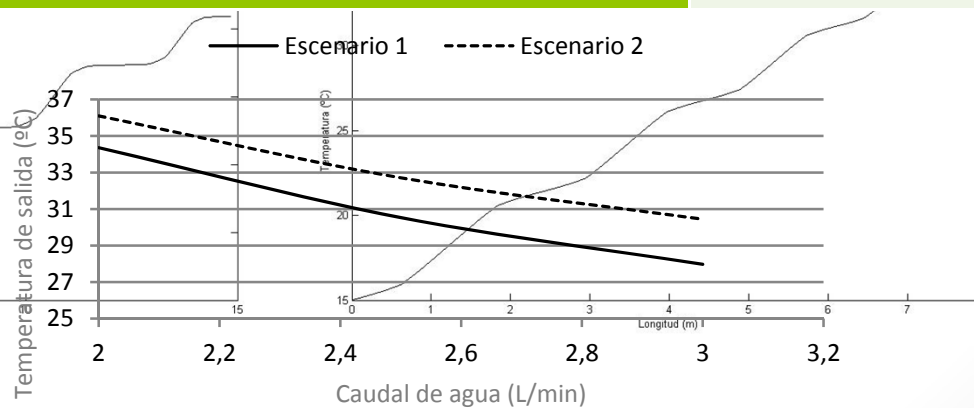
### Quemador

### Intercambiador

### Carcasa

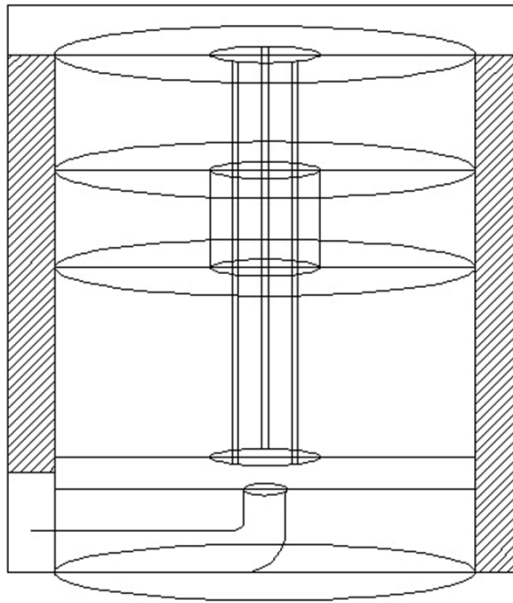


	Cantidad	Bs/ud	Bs.
Tubo metálico 1'	25 cm	150 Bs/m	30
Manguito hembra metálico ½' - 1'	1 uds.	7 Bs/ud	7
Codo 90º metálico hembra 1' - ¾'	1 uds.	6 Bs/ud	6
Válvula de bola hembra ½' - ½'	1 uds.	10 Bs/ud	10
Chapita metálica ¾'	1 uds.	0	0
Plato cerámico	1 uds.	2 Bs/ud	2
Mano de obra	10 min.	100 Bs/h	15
Tubo intercambiador, 7 mm.	10,5 m.	22 Bs/m	231
Adaptador serpentín manguera	2 uds.	5 Bs	10
Mano de obra	0 min.	0	0
Ladrillos de arcilla o adobe	-	0	0
Cemento o arcilla	-	0	0
Plancha metálica,	1 uds	450 Bs/m²	30
Barra acero corrugado 50 mm.	1 m.	10 Bs/m	10
Mano de obra	20 min.	100 Bs/h	30
Coste total			381



# Conclusiones

- Posibles mejoras
  - Cierre del hueco interno del serpentín
  - Intercambiador más cerca de la llama
  - Aumentar transferencia de calor por radiación
    - Bobinados más externos hasta por debajo del cabezal del quemador
    - Material de alta reflectividad (papel de aluminio)
  - Intercambiador solar previo a la entrada al calentador
  - Colocación del calentador en la vivienda
- Limitaciones del experimento
  - No todas las variables se pudieron medir experimentalmente
  - Hay que tener en cuenta los errores en las pruebas



# Camino a seguir

- Los resultados se consideran satisfactorios
- No es el único diseño posible. Se recopila información útil

GRACIAS

